Aus dem Institut für Arbeitsphysiologie und
Rehabilitationsforschung der Universität Marburg
Direktor: Prof. Dr. G. Hildebrandt

Pneumometrische Untersuchungen über die bronchomotorische Arbeitsreaktion bei kontinuierlich ansteigender Belastung

INAUGURAL - DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades
der gesamten Medizin der Hohen Medizinischen Fakultät
der Philipps - Universität zu Marburg

vorgelegt von

Ludwig Pöllmann

aus Znaim/Niederdonau

Marburg 1968

Kleinoffsetdruck: Görich & Weiershäuser, Marburg

Aus dem Institut für Arbeitsphysiologie und
Rehabilitationsforschung der Universität Marburg
Direktor: Prof. Dr. G. Hildebrandt

Pneumometrische Untersuchungen über die bronchomotorische Arbeitsreaktion bei kontinuierlich ansteigender Belastung

UNIV. LIBRARY MARBURG

INAUGURAL - DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades
der gesamten Medizin der Hohen Medizinischen Fakultät
der Philipps - Universität zu Marburg

vorgelegt von

Ludwig Pöllmann

aus Znaim/Niederdonau

Marburg 1968

Kleinoffsetdruck: Görich & Weiershäuser, Marburg

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Angenommen von der Medizinischen Fakultät
der Universität Marburg/Lahn am 12. August 1968
gedruckt mit Genehmigung der Fakultät
Dekan: Prof.Dr.med. R. Siegert
Referent: Prof.Dr.med. G. Hildebrandt
Correferent: Prof.Dr.med.W.Schmid

Inhaltsverzeichnis

		Seite
I.	Einleitung	1
II.	Methodik	3
	1. Versuchspersonen	3
	2. Untersuchungsmethoden	5
	a) Ergometrie	5
	b) Pneumometrie	5
	c) Vitalkapazität	6
	d) Atemfrequenz	6
	e) Pulsfrequenz	7
	f) Inhalation mit Aludrin(R)	8
	3. Untersuchungsablauf	8
	4. Auswertung der Meßergebnisse und statistische Methoden	12
III.	Ergebnisse	15
	1. Gruppenuntersuchungen	15
	a) Mittleres Verhalten der Meßgrößen	15
	b) Reproduzierbarkeit der Ergebnisse im Einzelfall	22
	c) Die Abhängigkeit der bronchomotorischen Arbeitsreaktion vom Ausgangswert	25
	d) Die Beziehungen der bronchomotorischen Arbeitsreaktion zum Leistungsverhalten von Puls- und Atemfrequenz	30
	e) Bronchomotorische Arbeitsreaktion und Aludrinwirkung	32
	f) Zur Frage der Reaktionsbesonderheiten bei Rauchern	35
	2. Individuelle Längsschnittbeobachtungen	35
IV.	Diskussion	41
	1. Zur Methodik	41
	a) Die Eignung der Pneumometrie zur Erfassung der bronchomotorischen Arbeitsreaktion	41
	b) Zur Auswertung der pneumometrischen Meßwerte	43
	c) Leistungswille und Leistungsfähigkeit der Versuchspersonen	44
	2. Zu den Ergebnissen	48
	3. Zum Mechanismus der bronchomotorischen Arbeitsreaktion	53

Seite

4. Zur Prüfung der bronchomotorischen Arbeitsreaktion 56

V. Zusammenfassung 58

VI. Literaturverzeichnis 60

I. Einleitung

Obwohl angenommen werden darf, daß bei der Ventilationssteigerung während Körperarbeit eine zweckmäßige Steuerung des Strömungswiderstandes der Luftwege erhöhte Bedeutung gewinnt, ist die bronchomotorische Arbeitsreaktion erst in jüngerer Zeit näher untersucht worden. Wegen der methodischen Schwierigkeiten einer direkten Messung der Strömungswiderstände am arbeitenden Menschen hat dazu die Untersuchung der maximalen Stromstärke beim exspiratorischen Atemstoß bevorzugt Anwendung gefunden.

OTTO (1937) berichtete als erster über eine Zunahme des Atemstoßes in unmittelbarem Anschluß an körperliche Belastungen. Weitere Untersuchungen von STEIGER u. HADORN (1946), die bereits mit einem geeichten Pneumometer n. HADORN (1942) vorgenommen wurden, konnten die Annahme einer bronchodilatorischen Reaktion auf Arbeit bestätigen. Dabei fanden sich auch Anhalte dafür, daß das Ausmaß dieser Reaktion mit steigender Belastung zunimmt und bei länger dauernder Arbeit konstant bleibt (vgl. auch WILBRANDT 1946). Die Autoren führten die Zunahme des Atemstoßes auf eine jede Muskelarbeit begleitende Adrenalinausschüttung im Sinne einer Notfall-Funktion (CANNON 1927) zurück. Dieser Auffassung haben sich auch weitere Autoren aufgrund ähnlicher Beobachtungen angeschlossen (HÄUSLER u. JULICH 1960; u.a.).

Systematische Untersuchungen über die Veränderungen des Pneumometerwertes bei dosierter Arbeitsbelastung wurden erstmals von HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) vorgenommen, wobei auch die Beziehungen zum Verlauf von Puls- und Atemfrequenz berücksichtigt wurden. Sie prüften den Atemstoß mit dem Pneumometer MINIMUS n. HILDEBRANDT (1963) unter steady-state-Bedingungen im Bereich bis zu 120 Watt Tretarbeit und fanden eine im Mittel gut lineare Zunahme um 0,8% des Ausgangswertes pro 10 Watt. Auch bei erschöpfender Arbeit wurde das eingestellte Niveau bis zum Arbeitsabbruch

gehalten. Die individuellen Gradienten der Pneumometerwertsteigerung zeigten eine enge positive Korrelation zur Anstiegssteilheit von Puls- und Atemfrequenz, wobei gut trainierte Leistungssportler beträchtlich geringere Steilheiten bis zum völligen Ausbleiben einer bronchomotorischen Arbeitsreaktion aufwiesen (vgl. HILDEBRANDT 1966).

Da der Verlauf der Pneumometerwerte während Arbeit und Erholung nicht dem bekannten Verhalten des Katecholaminspiegels im Blut entsprach, lehnten HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) die von STEIGER u. HADORN (1946) angenommene Adrenalinausschüttung als Hauptursache der Bronchialerweiterung bei Arbeit ab. Wegen der engen Koppelung der Veränderungen mit der Kreislauf- und Atmungsregulation wurde dafür eine überwiegend vegetativ-nervöse Steuerung der bronchomotorischen Arbeitsreaktion vermutet, zumal sich auch der bronchodilatierende Effekt von Rückatmungsversuchen als wesentlich geringer erwies.

Die eigenen Untersuchungen hatten die Aufgabe, den Verlauf der Pneumometerwerte und seine Beziehungen zum Leistungsverhalten von Puls- und Atemfrequenz auch unter den Bedingungen einer kontinuierlich steigenden Arbeitsbelastung zu beobachten. Da die Steilheit der Pulsfrequenzzunahme bei kontinuierlicher Belastungssteigerung als gut standardisiertes Kriterium der körperlichen Leistungsfähigkeit gilt (Leistungspulsindex n. MÜLLER 1950, 1962), sollte insbesondere geprüft werden, ob und mit welcher Sicherheit eine gleichzeitige Beurteilung der bronchomotorischen Arbeitsreaktion in Form eines entsprechenden Leistungsindex möglich ist und inwieweit dieser die von HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) bei stufenweiser Belastungssteigerung gefundenen Beziehungen zu Puls- und Atemfrequenz aufweist. Darüber hinaus sollte die Zunahme des Pneumometerwertes bis zu 200 Watt Belastung verfolgt und mit der bronchodilatierenden Wirkung einer im gleichen Untersuchungsgang vorgenommenen Aludrin $^{(R)}$-Inhalation verglichen werden, um weitere Anhalte für den Mechanismus der bronchomotorischen Arbeitsreaktion zu gewinnen.

II. Methodik

In der Zeit vom 1. August bis 31. Oktober 1965 wurden an 52 gesunden Versuchspersonen insgesamt 86 Arbeitsversuche mit kontinuierlich ansteigender Belastung auf dem Fahrradergometer durchgeführt, bei denen Pneumometerwert sowie Puls- und Atemfrequenz fortlaufend kontrolliert wurden. Bei drei Probanden wurden diese Versuche über einen Zeitraum von mindestens 30 Tagen täglich wiederholt.

1. Versuchspersonen

Die Untersuchungen wurden auf männliche Versuchspersonen beschränkt, um Einflüsse des Menstruationszyklus auf die Ergebnisse auszuschalten (Lit.-Übersichten s. ARTNER 1954, 1960; HILDEBRANDT 1962). Alle Probanden, 47 Soldaten *) im Alter zwischen 19 und 24 Jahren und 5 Institutsangehörige zwischen 24 und 41 Jahren, stellten sich freiwillig und unentgeltlich zur Verfügung. 15 von ihnen waren Nichtraucher, 12 schwache Raucher (bis 10 Zigaretten pro Tag) und 25 starke Raucher (über 10 Zigaretten pro Tag). Den Rauchern war an den Versuchstagen das Rauchen erst nach Abschluß der Untersuchungen gestattet. Bis auf wenige Ausnahmen trieben die Probanden im Untersuchungszeitraum regelmäßig Sport, einige sogar Leistungssport. Tabelle 1 a gibt einen Überblick über das durchschnittliche Verhalten von Pneumometerwert und Ruhe-Atemfrequenz bei allen 52 Erstuntersuchungen (vgl. Abb. 13).

Die Längsschnittuntersuchungen wurden an 3 Institutsangehörigen durchgeführt, für die nähere Daten in Tabelle 1 b zusammengestellt sind.

---

*) Mit freundlicher Unterstützung der Bundeswehr.

Tabelle 1 a

	n	Mittelwert M ± Standardabweichung σ
Pneumometerwert im Sitzen (% d.Sollw.) Max.-Wert aus 5 Messungen	52	86,1 ± 17,6
Vitalkapazität Max.-Wert aus 3 Messungen (% d.Sollw.)	52	107,8 ± 11,4
Pulsfrequenz im Liegen (min^{-1})	52	64,5 ± 13,2
Atemfrequenz im Liegen (min^{-1})	52	16,1 ± 3,4

Tabelle 1 b

Versuchsperson	E.	K.	P.
Alter (Jahre)	28	29	24
Körpergröße (cm)	184	183	178
Körpergewicht (kg)	80	73	84
Raucher	nein	3-4 Zig./Tag	nein
Pneumometerwert im Sitzen Maximum aus 5 Messungen (% d.Sollw.)	83,0	105,0	89,3
Vitalkapazität (% d.Sollw.)	114,6	113,5	107,7
Pulsfrequenz im Liegen (min^{-1})	57	71	73
Atemfrequenz im Liegen (min^{-1})	17,0	10,3	19,1

2. Untersuchungsmethoden

a) Ergometrie

Alle Belastungsversuche wurden mit demselben Fahrradergometer LODE/LANOOY 1965 neuester Bauart unter Verwendung der automatischen Zusatzeinrichtung für lineare Belastungssteigerung (Hersteller: Lode Instrumenten NV/Groningen) durchgeführt. Für alle Belastungen wurde die gleiche Umdrehungszahl gefordert. Diese wurde von der Versuchsperson an einem Drehzahlmesser, dessen Skala im Gesichtsfeld lag, selbst kontrolliert (Anzeige von 60 Umdrehungen pro Minute, was einem tatsächlichen Wert von 53 Pedalumdrehungen pro Minute entsprach (vgl. MELLEROWICZ 1962, 1966; MÜLLER 1962)). Die objektive Kontrolle der Pedalumdrehungen geschah dadurch, daß vom rechten Pedal des Ergometers bei senkrechter Stellung über der Achse kurzzeitig ein Stromkreis geschlossen wurde, der von einer 1,5 Volt Taschenlampenbatterie gespeist war. Die Registrierung erfolgte gemeinsam mit anderen Meßgrößen auf dem Direktschreiber (s.ff.). Vorübergehende Abweichungen bis zu $\pm$ 2 Umdrehungen pro Minute von der vorgeschriebenen Tretfrequenz ergaben Leistungsschwankungen unter 2%.

b) Pneumometrie

Die Atemstoßmessungen wurden mit dem Pneumometer "MINIMUS" nach Prof. Dr. G. Hildebrandt (Hersteller: Fa. Speidel & Keller, Jungingen/Hohenzollern) durchgeführt (HILDEBRANDT u. HANKE 1956). Das Gerät arbeitet nach dem Prinzip der Staudruckmessung. Eine Höchstwertanzeige ermöglicht ein nachträgliches Ablesen der maximalen Exspirationsstromstärke. Die Meßgenauigkeit wird vom Hersteller mit $\pm$ 0,1 l/sec angegeben, was besonders für den Bereich über 4 l/sec bei einer Nachprüfung durch HALLETT u. MARTIN (1962) bestätigt wurde. Das Gerät ist besonders handlich. Die Ausführung des Atemstoßes setzt keine besondere Körperhaltung voraus wie bei anderen Geräten mit Höchstwertanzeige (vgl. WRIGHT u. McKERROW 1959).

Für alle Untersuchungen wurde ein und dasselbe Gerät benutzt. Die Messungen fanden in aufrecht sitzender Haltung auf dem Fahrradergometer statt. Für jeden Probanden wurde entsprechend der Mundgröße eines der drei Originalgummimundstücke mit Bißfurche ausgesucht, das maximale Kieferöffnung gewährleistete (HILDEBRANDT 1963; HILDEBRANDT u. HANKE 1956). Die Versuchsperson wurde angewiesen, nach maximaler Inspiration alle Luft möglichst schnell und kräftig durch das Blasrohr hauchend auszustoßen. Hustenstöße wurden nicht gewertet. Die Technik des Atemstoßes wurde schnell erlernt; es mußte lediglich darauf geachtet werden, daß beim Halten des Blasrohres nicht versehentlich die distale Öffnung verdeckt wurde. Auf die Anwendung einer Nasenklemme, wie sie von FABEL u. HAMM (1962) empfohlen wurde, haben wir im Interesse einer ungestörten Arbeitsatmung verzichtet; sie schien auch nicht notwendig, da der Nasenverschluß nur bei stark vermindertem Atemstoß den Pneumometerwert erhöhen kann (HÄUSLER u. JULICH 1960).

c) Vitalkapazität

Die Messung der Vitalkapazität wurde im Sitzen mit einem Trockenspirometer (Marke ÄSKULAP) vor dem Belastungsversuch durchgeführt. Der Proband wurde angewiesen, die Luft gleichmäßig und nicht zu schnell einzublasen (FABEL u. HAMM 1962; HILDEBRANDT 1963; HILDEBRANDT u. HANKE 1956). Das in mindestens 3 aufeinanderfolgenden Messungen erzielte Maximum wurde gewertet. Auf eine Korrektur der Meßwerte auf intrapulmonale BTPS-Bedingungen (Körpertemperatur, aktueller Barometerdruck, Wasserdampfsättigung) wurde verzichtet (vgl. BARTELS u. Mitarb. 1959; ANTHONY u. VENRATH 1962; HOFF 1962).

d) Atemfrequenz

Im Liegen wurde die Atembewegung mit einer abdominal in Gürtelhöhe angelegten Rumpfmanschette bei einem Manschettendruck zwischen 10 bis 15 mm Quecksilber registriert. Die Versuchspersonen wurden über den Zweck der Anordnung im unklaren gelassen, um einen ungestörten spontanen Atmungsablauf in entspannter Haltung zu gewährleisten. Die

Schreibung erfolgte auf einem Oscillographen nach GESENIUS u. KELLER (Hersteller: Fa. Speidel & Keller, Jungingen/ Hohenzollern) mit einer Papiergeschwindigkeit von 20 cm/min (HILDEBRANDT, A. u. G. 1958; HILDEBRANDT u. HILDEBRANDT-EVERS 1953).

Zur Registrierung während Arbeitsbelastung und Erholung wurde ein thermoelektrischer Meßfühler verwendet, welcher Inspirations- und Exspirationsbeginn durch den sprunghaften Wechsel der Lufttemperatur im Naseneingang anzeigt. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß Muskelbewegungen in keiner Weise die Atemregistrierung stören. Wir benutzten ein von STORCH (1967) entwickeltes Meßelement. Es besteht aus einem Kunststoffnasenreiter, der mit Heftpflasterstreifen fixiert wird. Seine dünnen gebogenen Fortsätze ragen etwa 3 mm frei in die Nasenlöcher hinein und tragen je vier Kupfer-Konstantan-Thermoelemente (Drahtstärke 0,10 mm), die in Serie geschaltet sind. Die Zuleitung erfolgt über Nasenrücken und Stirn. Die 8 Vergleichslötstellen befinden sich in einem kleinen thermisch isolierten Behälter, der zusammen mit der Zuleitung am Rücken des Probanden mit Heftpflaster fixiert war, um Behinderungen während der Arbeit zu vermeiden. Registriert wurde anfangs auf dem EKG-Kanal eines HELLIGE Multiscriptor 9400/6 (Hersteller: Fa. Hellige, Freiburg i.Br.), für die späteren Untersuchungen stand ein technischer Schnellschreiber Helco-Scriptor (Hersteller: Fa. Hellige, Freiburg i.Br.) zur Verfügung. Bei beiden direktschreibenden Geräten wurde eine Papiergeschwindigkeit von 15 cm/min gewählt.

<u>e) Pulsfrequenz</u>

Im Liegen wurde der Ruhepuls mittels einer Oberarmmanschette auf dem zweiten Schreibsystem des zur Atemschreibung benutzten Oscillographen registriert (HILDEBRANDT, A. u. G. 1958; HILDEBRANDT u. HILDEBRANDT-EVERS 1953). Während der Arbeitsbelastung war diese Schreibung wegen der störenden Muskelbewegungen nicht möglich. Die Pulskontrolle erfolgte daher während Belastung und nachfolgender Erholung durch fortlaufende bipolare Ableitung des Elektrokardiogramms.

Dazu wurden Silberblechelektroden von der Größe 25 x 20 mm verwendet, die im Bereich des Herzspitzenstoßes und über dem Sternum in Höhe des 5. Interkostalraumes mit Heftpflaster befestigt wurden. Als Kontaktmittel benutzten wir Elektrodengelee (Hersteller: Fa. Hellige, Freiburg i.Br.).

f) Inhalation mit Aludrin

Die zum Vergleich mit der Arbeitsreaktion durchgeführte Aludrin$^{(R)}$-Inhalation wurde in Form einer Maskeninhalation mit dem PARI-Optimalvernebler/Modell Primus (Hersteller: Fa. P. Ritzau, Pari-Werk, Starnberg/Obb.) vorgenommen. Der Verneblerkamin wurde auf höchste Nebelleistung und das Luftstromsteuer auf "normal" eingestellt. Wir vernebelten ohne exspiratorische Unterbrechung des Luftstroms eine 0,33%ige Aludrin-Lösung, die wir durch Verdünnung aus der handelsüblichen 1%igen Aludrin-Lösung zum Zerstäuben (Hersteller: Fa. H.C. Boehringer Sohn, Ingelheim/Rhein) zu jedem Untersuchungstermin frisch zubereiteten. Diese Konzentration war in Untersuchungen von ROHE (1965) als optimal ausgetestet worden (Lit.-Übersicht s. HILDEBRANDT u. ROHE 1964).

Die Inhalation erstreckte sich auf 10 tiefe Atemzüge. Nach jeder Minute wurde eine Atemstoßmessung mit dem Pneumometer bis zum Ablauf der 10. Minute durchgeführt, wobei die Zeit bereits vom Ende des 5. Atemzuges der Inhalation ausgehend gemessen wurde, um die z.T. erheblichen Unterschiede der Inhalationsfrequenz etwas auszugleichen.

3. Untersuchungsablauf

Um tagesrhythmische Einflüsse (Lit.-Übersicht bei HILDEBRANDT 1962; MENZEL 1962), insbesondere auch auf den Pneumometerwert und das Pulsverhalten (HILDEBRANDT 1960 b; ZUIDEMA u. ESSEL 1965; AEPLI 1966; VOIGT u. Mitarb. 1967; WYSS 1967) auszuschalten, wurden alle 86 Einzeluntersuchungen in der Zeit zwischen 8.00 und 12.00 Uhr vormittags durchgeführt. Sie fanden in einem Raum statt, dessen Lufttemperatur nur in begrenztem Umfange geregelt werden konnte und während

Abb. 1 Überblick über die Versuchsanordnung. Einzelheiten s. im Text.

der Versuche zwischen 19,5 und 25,3 Grad Celsius (Mittelwert 22,5 Grad, Standardabweichung $\sigma = \pm 1{,}15$) schwankte. Die Versuchspersonen waren mit Sporthose und leichten Schuhen bekleidet (vgl. MELLEROWICZ 1962, 1966). Auf Wunsch wurden sie mit einer Wolldecke bedeckt.

Die Probanden wurden zur Untersuchung jeweils nur zugelassen, wenn sie bei einer eingehenden Erhebung ihres subjektiven Befindens angaben, daß sie sich voll leistungsfähig fühlten. In 24 Fällen war es notwendig, die vorgesehenen Untersuchungen zu verschieben, da die Versuchspersonen an interkurrenten Erkältungskrankheiten oder an Muskelkater infolge anderweitiger körperlicher Beanspruchung litten.

Nach einer kurzen Demonstration des Versuchsablaufs ruhten die Probanden auf einem Bett in entspannter Rückenlage mit bereits angelegten Registriermanschetten für die Dauer von 8 Minuten. Danach wurden Puls und Atmung während 2 Minuten registriert. Die letzte Minute wurde als "Ruhewert im Liegen" gewertet. Anschließend wurde mittels der bereits angelegten Oberarmmanschette der Blutdruck im Liegen gemessen.

Nach Hinsetzen wurde zunächst die Vitalkapazität dreimal hintereinander bestimmt. Die Sitzhöhe des Fahrradergometers wurde jeweils so eingestellt, daß die Knie der Probanden beim Niedertreten durchgestreckt waren. Geräte und Versuchspersonen wurden sorgfältig geerdet. Mit bereits angelegten Meßfühlern wurde zum Erlernen der Technik des Atemstoßes vorerst mindestens fünfmal der Pneumometerwert gemessen. Erst wenn ein gleichmäßiges Niveau der Meßwerte erreicht war, wurden im Abstand von einer Minute fünf weitere Pneumometerwerte als gültig protokolliert. In der letzten Minute wurden wiederum Puls und Atmung zur Bestimmung der Ruhefrequenz im Sitzen registriert.

Vor Beginn der Arbeit wurde das Fahrradergometer im Leerlauf (ca. 5 Watt) vom Untersucher auf eine Umdrehungszahl von ca. 60/min gebracht; dann wurde die Versuchsperson aufgefordert, diese Drehzahl zu halten. Da der Arbeitsbereich

des Zusatzgerätes zur automatischen Belastungssteigerung erst ab 20 Watt beginnt, wurde der Generatorwiderstand zunächst von Hand für je eine Minute auf 10 und 20 Watt eingestellt und erst anschließend die Automatik eingeschaltet, welche die Belastung pro Minute linear um 10 Watt bis 200 Watt steigerte. Die Gesamtarbeitszeit betrug also 20 Minuten.

Unter fortlaufender Registrierung von Puls und Atmung sowie des Tretrhythmus (in etwa 50% der Fälle) wurde der Atemstoß auf Zuruf des Untersuchers am Ende jeder Minute einmal gemessen. Dazu steckte die Versuchsperson jedes Mal das mit dem Gummimundstück versehene Blasrohr in den Mund. Dieses war in Mundnähe gut erreichbar aufgehängt, so daß die Messung ohne wesentliche Behinderung der Arbeit vorgenommen werden konnte. Dafür sprach auch die Tatsache, daß keine besonderen Drehzahlschwankungen im Zusammenhang mit der Atemstoßmessung auftraten. Das Anzeigegerät des Pneumometers war in horizontaler Lage fixiert und - wie auch alle übrigen Registrierinstrumente - so abgeschirmt, daß die Versuchsperson keinen der Meßvorgänge beobachten konnte. Der Übergang zu kontinuierlicher Mundatmung sowie die erste Beobachtung sichtbarer Schweißperlen auf der Stirn wurden vom Untersucher notiert.

2 Versuchspersonen brachen den Belastungstest in der 19. Minute (190 Watt), 1 Versuchsperson bereits in der 15. Minute (150 Watt) unter der Angabe, erschöpft zu sein, ab.

Der Ablauf der Erholung wurde für die Dauer von 10 Minuten beobachtet. Dazu blieben die Probanden ruhig auf dem Fahrradergometer sitzen. Bei fortlaufender Registrierung von Puls und Atmung wurde der Pneumometerwert weiterhin nach Ablauf jeder Minute einmal kontrolliert.

Sobald die Versuchspersonen sich völlig erholt fühlten, nahmen sie zur Durchführung des Aludrin-Testes auf einem bequemen Stuhl Platz. Nach der beschriebenen Inhalation von 10 tiefen Atemzügen (vgl. S. 8) wurde der Pneumometerwert wiederum 10 Minuten lang in minütlichen Abständen

gemessen, wozu dasselbe Meßgerät benutzt wurde.

Bei 34 der Versuchspersonen wurden die geschilderten Untersuchungen zweimal durchgeführt. Um dabei Trainingseinflüsse auf die zweite Untersuchung auszuschließen, wurden untersuchungsfreie Intervalle von mindestens 9 Tagen (Mittelwert 42 Tage) eingehalten (vgl. MÜLLER u. HETTINGER 1956; STOBOY u. FRIEDEBOLD 1963).

Bei den Längsschnittuntersuchungen wurden die geschilderten Belastungstests täglich und jeweils zur gleichen Tageszeit (Standardabweichung $\sigma = \pm 1{,}7$ Stunden) über mindestens 32 Tage hin durchgeführt. Die vorangehenden Messungen im Liegen, die Einübung der Atemstoßtechnik sowie die nachfolgende ALUDRIN-Inhalation wurden allerdings nur bei der Erstuntersuchung vorgenommen, die Bestimmung der Vitalkapazität beschränkte sich auf den ersten und letzten Untersuchungstermin.

4. Auswertung der Meßergebnisse und statistische Methoden

Der Pneumometerwert wurde auf 0,1 l/sec genau abgelesen. Bei Überschreiten des Anzeigebereichs nach oben (weniger als 2% aller Meßwerte) wurden die Werte extrapolierend geschätzt. Die Vitalkapazität wurde auf 10 ml genau abgelesen.

Die Bestimmung der individuellen Sollwerte sowie die Umrechnung der Istwerte von Vitalkapazität und Pneumometerwert in Prozent der Sollwerte erfolgte mit Hilfe der "Rechenscheibe zur Atemfunktionsdiagnostik" nach HILDEBRANDT (1960 a, 1963). Diese Rechenscheibe berücksichtigt den Einfluß von Geschlecht, Alter und Körpergröße, wobei für die Vitalkapazität die Normwerte von BALDWIN u. Mitarb. (1948) und für den Pneumometerwert die von HILDEBRANDT u. HANKE (1956) zugrunde gelegt sind:

Soll-VK (Männer) = (27,63 - (0,112 x Alter)) x Größe (cm)
Soll-VK (Frauen) = (21,78 - (0,101 x Alter)) x Größe (cm)
$\text{Soll-AS} = \frac{\text{Soll-VK}}{0{,}425}$ l/sec

Die Atemfrequenz entnahmen wir den registrierten Atemkurven (Schätzgenauigkeit 0,1 A/min). Dabei blieben während der Arbeit jeweils diejenigen Halbminuten unberücksichtigt, in denen der Atemstoß ausgeführt wurde, weil dieser naturgemäß zu Unregelmäßigkeiten des Atemrhythmus führt. Die Pulsfrequenz wurde im bipolaren Elektrokardiogramm einminütlich ausgezählt (Meßgenauigkeit 1 P/min).

Die Steilheit der belastungsabhängigen Änderungen des Pneumometerwertes wurde aus den einminütlich bestimmten Meßwerten über jeweils 10 min als Regression mit der von MÜLLER (1962) für den Leistungspulsindex angegebenen vereinfachten Methode berechnet:

Leistungsindex (LI) =

$$\frac{(9(x_{10}-x_1))+(7(x_9-x_2))+(5(x_8-x_3))+(3(x_7-x_4))+(1(x_6-x_5))}{9^2 + 7^2 + 5^2 + 3^2 + 1^2},$$

wobei x_1 bis x_{10} die Reihenfolge der Meßwerte in dem betreffenden Bereich bedeutet.

Für den Pneumometerwert (Atemstoß) wurden die Leistungsindizes (LASI) für drei verschiedene Belastungsbereiche bestimmt, und zwar 0 - 100 Watt (LASI 0-100), 50 - 150 Watt (LASI 50-150) sowie 100 - 200 Watt (LASI 100-200).

Bei der Bestimmung entsprechender Indexwerte für das leistungsabhängige Verhalten der Pulsfrequenz konnte die von MÜLLER (1950, 1962) für den Bereich 0 bis 100 Watt angegebene Originalmethode nicht angewendet werden, da das von uns benutzte Fahrradergometer eine kontinuierliche Leistungssteigerung erst ab 20 Watt erlaubte und daher die Gefahr einer initialen Überhöhung der Pulswerte bebestand (vgl. Abb. 2). Wir bestimmten daher den Leistungspulsindex (LPI 0-100) unter Ausschluß der ersten beiden Arbeitsminuten mit entsprechend verkürzter Formel nur im Bereich von 20 bis 100 Watt. Den pneumometrischen Leistungsindizes (LASI-Werten) entsprechend wurden auch für die Bereiche 50 - 150 Watt und 100 - 200 Watt weitere Leistungspulsindexwerte errechnet (LPI 50-150 bzw. LPI 100-200).

Zur Kennzeichnung des leistungsabhängigen Verhaltens der Atemfrequenz beschränkten wir uns (aus später erläuterten Gründen) auf die Bestimmung eines entsprechenden Leistungsindex im Bereich 50 bis 150 Watt (LAI 50-150).

Die Berechnung der Streuung (σ) sowie des mittleren Fehlers der Mittelwerte (σ_M) erfolgte in üblicher Weise nach den Formeln:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\Sigma (x-M)^2}{n-1}} \qquad (1)$$

$$\sigma_M = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \qquad (2)$$

Zur Signifikanzprüfung von Differenzen verwendeten wir den t-Test, wobei die Signifikanzgrenzen der STUDENT-Verteilung zugrundegelegt wurden (DOCUMENTA GEIGY, Wissenschaftliche Tabellen 1960).

Die korrelationsstatistischen Untersuchungen wurden unter Annahme linearer Korrelationen nach den Angaben von SALINGER (1926) durchgeführt. Die Formel für den Korrelationskoeffizienten (r) lautet:

$$r = \frac{1}{n} \cdot \frac{\Sigma (x-x_o)(y-y_o)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \qquad (3)$$

Der mittlere Fehler des Korrelationskoeffizienten (m_r) errechnete sich nach der Formel:

$$m_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{n}} \qquad (4)$$

III. Ergebnisse

1. Gruppenuntersuchungen

a) Mittleres Verhalten der Meßgrößen

Abb. 2 gibt zunächst einen Überblick über das Gesamtverhalten der einzelnen Meßgrößen in den verschiedenen Untersuchungsabschnitten. Wie der obere Abbildungsteil zeigt, nimmt der Pneumometerwert (Atemstoß) im Mittel aller 86 Einzeluntersuchungen von der 2. Arbeitsminute (20 Watt) ab nahezu linear mit einer Steilheit von ca. 1% d.Sollw./10 Watt zu, und zwar bis in den Bereich der 10. Arbeitsminute (100 Watt). Die Ergebnisse der Signifikanzprüfung, die anhand der eingezeichneten Fehlerbereiche für einzelne Versuchsabschnitte durchgeführt wurde, sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Bei weiterer Steigerung der Belastung bleibt der mittlere Pneumometerwert zunächst auf dem gleichen Niveau, um erst ab 150 Watt erneut mit etwa der halben initialen Steilheit weiter bis 200 Watt anzusteigen. Nach Arbeitsende fällt der Pneumometerwert während der Erholung innerhalb weniger Minuten in exponentiellem Verlauf auf ein Niveau ab, das im Mittel aller Einzeluntersuchungen etwas über den Ruhewerten vor Belastungsbeginn liegt. Die nachfolgende Aludrin-Inhalation läßt den Pneumometerwert nach 2 min im Mittel um ca. 4% des Sollwertes ansteigen. Die bronchodilatorische Wirkung ist aber bereits nach der 6. Minute abgeklungen und geht offenbar in eine negative Nachschwankung über, die nach der 10. Minute noch nicht beendet war.

Ergänzend zeigt Abb. 3 anhand der Summenhäufigkeiten, in welchem Bereich der kontinuierlich zunehmenden Arbeitsbelastung zum ersten Male die individuell erzielten Maximalwerte des Pneumometerwertes gemessen wurden. Es ergibt sich, daß das Maximum in über 80% der Fälle erst oberhalb 100 Watt, in mehr als 50% der Fälle erst oberhalb 150 Watt eingetreten ist.

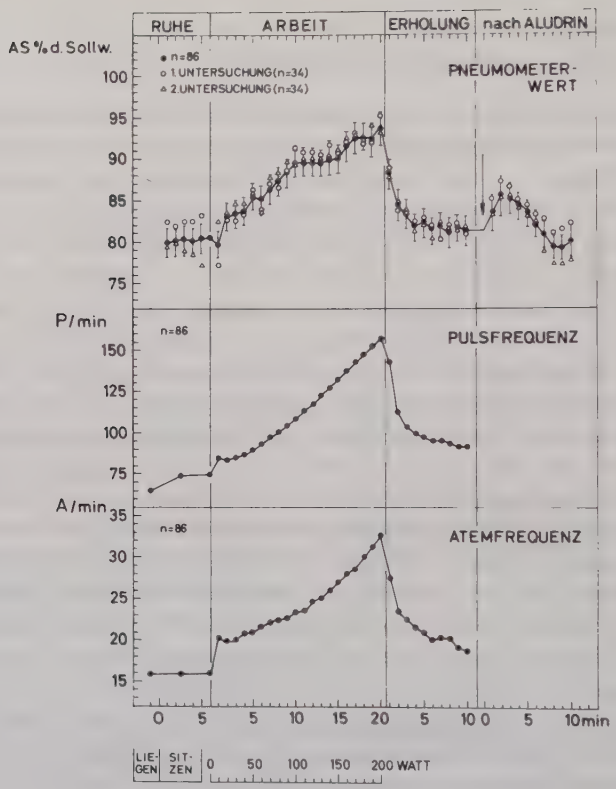

Abb.2 Mittlerer Verlauf von Pneumometerwert, Pulsfrequenz und Atemfrequenz in 86 Untersuchungen. Beim Pneumometerwert (oben) wurden außerdem die Mittelwerte der 34 Erst- und Zweituntersuchungen angegeben. Die eingezeichneten Klammern geben den Bereich des mittleren Fehlers der Mittelwerte an.

Tabelle 2

Pneumometerwert

	n	Mittel-wert % d.Sollw.	σ	σ_M	Differenzen
Ruhe sitzend (5.Minute)	86	80,48	17,5	1,89	D= 5,1 p=0,05
5. Minute (50 Watt)	86	85,61	15,7	1,69	D= 9,1 p<0,001
10. Minute (100 Watt)	86	89,55	15,4	1,66	D= 9,7 p<0,001
15. Minute (150 Watt)	86	90,17	15,9	1,71	D=13,2 p<0,001
20. Minute (200 Watt)	86	93,72	18,1	1,95	D= 0,7 p<0,8
Erholung (8. Minute)	86	81,15	17,0	1,83	D= 5,1 p=0,07
Nach Aludrin (2. Minute)	86	85,53	19,7	2,12	D= 4,4 p=0,10

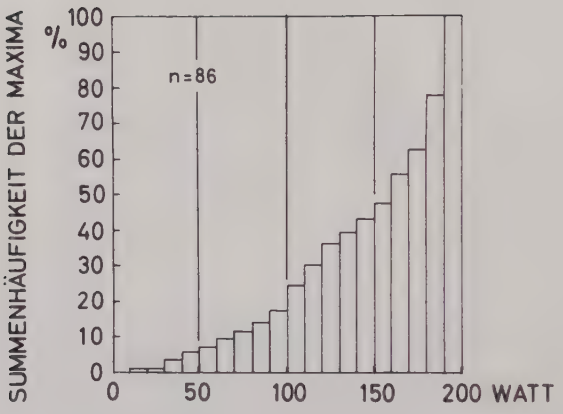

Abb. 3 **Summenhäufigkeit maximaler Pneumometerwerte bei kontinuierlich ansteigender Belastung (10 Watt/min) von 86 Untersuchungen.**

Die Pulsfrequenz (Abb. 2, Mitte) zeigt im Mittel aller 86 Untersuchungen den typischen belastungsabhängigen Anstieg. Die Linearität wird initial (bis zu 20 Watt) durch einen überschießenden Anstieg vorübergehend gestört, und außerdem findet sich oberhalb 100 - 120 Watt eine deutliche Steigerung der Anstiegssteilheit, wie sie bei Überschreiten der Puls-Dauerleistungsgrenze zu erwarten ist (MÜLLER 1961, 1962 1964).

Der belastungsabhängige mittlere Verlauf der Atemfrequenz (Abb. 2, unten) entfernt sich durch formal ähnliche Einflüsse weit mehr von einer Linearität (vgl. HILDEBRANDT u. CUNTZE 1965). Die initiale Überhöhung ist so stark und anhaltend, daß die Regressionslinie des ersten Kurventeils bei Belastungsbeginn deutlich über dem Ruheniveau liegen würde, und die Steilheitszunahme im oberen Belastungsbereich ist wesentlich stärker als bei der Pulsfrequenz. Hierbei dürfte die Abstimmung des Atemrhythmus mit dem frequenzfixierten Tretrhythmus eine stärkere Rolle spielen (vgl. HILDEBRANDT 1966; HILDEBRANDT u. DAUMANN 1965).

Abb. 4 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der pneumometrischen Leistungsindizes (LASI) für die 3 verschiedenen Belastungsbereiche in allen 86 Einzeluntersuchungen, die sich befriedigend einer Normalverteilung annähern. Erwartungsgemäß (vgl. Abb. 2) liegen die LASI 0-100-Werte im Durchschnitt am höchsten, während die LASI-Werte der höheren Belastungsbereiche fortschreitend geringer werden. Wie aus der statistischen Prüfung der Tabelle 3 hervorgeht, ist der Unterschied zwischen dem ersten Bereich und den beiden anderen jeweils hoch signifikant, während sich die Differenz zwischen den LASI 50-150 und 100-200 nicht statistisch sichern läßt. Mit dieser fortschreitenden Verminderung der Anstiegssteilheit der Pneumometerwerte nimmt zugleich die Häufigkeit negativer Reaktionen mit unter Null liegenden LASI-Werten zu, diese verdoppelt sich im Bereich 100-200 gegenüber 0-100.

In Tabelle 3 ist zugleich anhand der Korrelationskoeffizienten

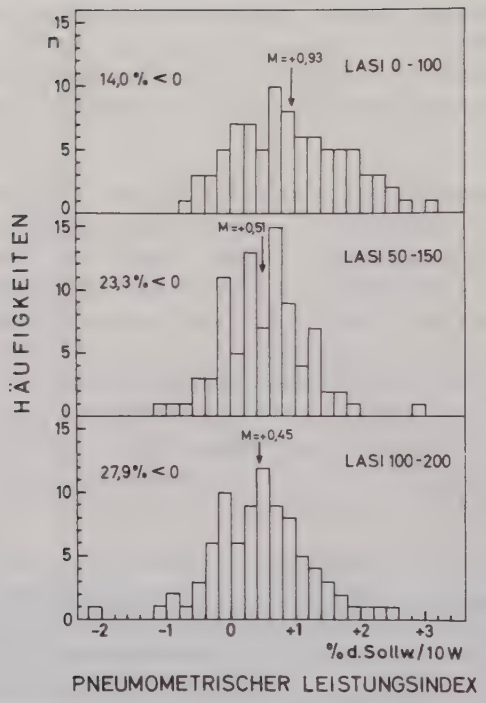

Abb. 4 Häufigkeitsverteilung der pneumometrischen Leistungsindizes (LASI) für die drei verschiedenen Belastungsbereiche (0 - 100, 50 - 150 und 100 - 200 Watt).

Tabelle 3

	M	σ	σ_M	VC %
LASI 0-100 (%d.S./10 W)	+0,93	0,82	0,10	88,5
LASI 50-150 (%d.S./10 W)	+0,51	0,66	0,07	127,8
LASI 100-200 (%d.S./10 W)	+0,45	0,76	0,08	167,7
LPI 0-100 (P min^{-1}/10 W)	3,57	0,87	0,09	24,4
LPI 50-150 (P min^{-1}/10 W)	4,35	0,91	0,10	20,9
LPI 100-200 (P min^{-1}/10 W)	4,94	0,96	0,10	19,5
LAI 50-150 (A min^{-1}/10 W)	+0,57	0,39	0,04	67,8

Werte-Paarung	Differenz D	p-Wert	Korrelations-koeffizient r	p-Wert
LASI				
0-100 / 50-150	D = 0,42	p = 0,001	r = + 0,33 $\pm$ 0,09	p < 0,001
0-100 / 100-200	D = 0,48	p < 0,001	r = + 0,14 $\pm$ 0,11	p < 0,20
50-150 / 100-200	D = 0,06	p > 0,50	r = + 0,04 $\pm$ 0,11	p > 0,70
LPI				
0-100 / 50-150	D = 0,78	p < 0,001	r = + 0,44 $\pm$ 0,09	p < 0,001
0-100 / 100-200	D = 1,37	p < 0,001	r = + 0,14 $\pm$ 0,11	p < 0,30
50-150 / 100-200	D = 0,59	p < 0,001	r = + 0,54 $\pm$ 0,08	p < 0,001

geprüft, inwieweit die Steilheit der Pneumometerwertsteigerung in den verschiedenen Belastungsbereichen individuell voneinander abhängig ist. Dabei errechnet sich nur für die sich teilweise überschneidenden Bereiche 0-100 und 50-150 eine schwache positive, aber statistisch signifikante Korrelation von $r = + 0{,}33 \pm 0{,}09$, während sonst keine Abhängigkeit nachweisbar ist. Daraus ist zu schließen, daß die Steilheit der bronchomotorischen Reaktion in einem der Belastungsbereiche keine sichere Voraussage über das Verhalten in den anderen Bereichen zuläßt.

Die Häufigkeitsverteilung der LPI-Werte für die 3 Belastungsbereiche zeigt Abb. 5, die Ergebnisse der statistischen Prüfungen sind gleichfalls in Tabelle 3 enthalten. Der zunehmenden Steilheit des mittleren Pulsanstiegs in Abb. 2 entsprechend verschiebt sich die LPI-Verteilung mit steigender Belastung nach rechts, wobei sich die Mittelwerte sämtlich signifikant voneinander unterscheiden. Wie Tabelle 3 ergibt, stehen die individuellen LPI-Werte der benachbarten Belastungsbereiche im Gegensatz zu den LASI-Werten in engerer Korrelation. Lediglich für die Bereiche 0-100 und 100-200 lassen sich keine statistisch sicheren Abhängigkeiten errechnen.

Der Vollständigkeit halber zeigt Abb. 6 die Häufigkeitsverteilung der Leistungsindizes für die Atemfrequenz (LAI), die nur im Bereich von 50 - 150 Watt bestimmt wurden. Die breite Streuung sowie das Vorkommen negativer Werte spricht erneut dafür, daß die leistungsabhängige Frequenzregulation durch Koppelungseffekte von seiten des Tretrhythmus beträchtlich gestört werden kann.

b) Reproduzierbarkeit der Ergebnisse im Einzelfall

Die Abb. 2 (oben) enthält neben dem durchschnittlichen Verlauf des Pneumometerwertes aller 86 Einzeluntersuchungen auch die Mittelwerte der ersten und zweiten Untersuchungen von den 34 Probanden, bei denen der Test wiederholt wurde. Während die Verläufe bei der Arbeitsbelastung und Erholung

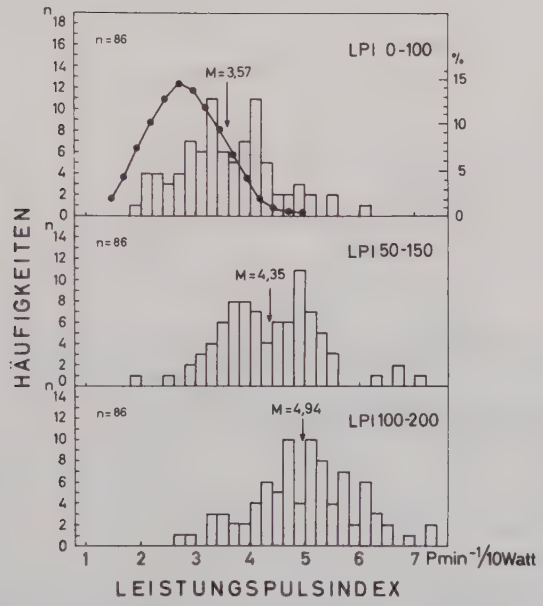

Abb. 5 Häufigkeitsverteilung der Leistungspulsindex-Werte (LPI) für die drei Belastungsbereiche (0 - 100, 50 - 150 und 100 - 200 Watt) bei 86 Untersuchungen. Für den Bereich 0 - 100 Watt ist außerdem die von MÜLLER (1962) an 1170 männlichen Versuchspersonen gefundene Verteilungskurve eingezeichnet.

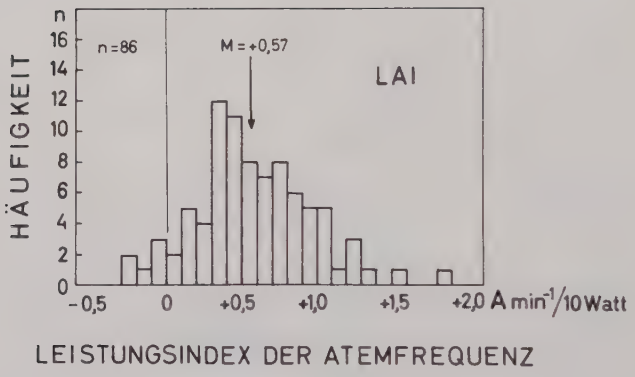

Abb. 6 **Häufigkeitsverteilung der Leistungsindex-Werte der Atemfrequenz für den Bereich 50 - 150 Watt bei 86 Untersuchungen.**

sowie im Anstieg nach der Aludrin-Inhalation praktisch vollkommen übereinstimmen und für eine gute Reproduzierbarkeit der Messung sprechen, besteht bei den einleitenden Ruhewerten ein deutlicher Niveauunterschied der beiden Untersuchungstermine, der sich auch beim Abklingen der Aludrin-Wirkung wieder einstellt, indem bei den Erstuntersuchungen im Mittel keine negative Nachschwankung auftritt.

Obwohl die Ruhepneumometerwerte (Maximum aus 5 Einzelmessungen) der ersten und zweiten Untersuchung hoch korreliert waren ($r = + 0{,}85 \pm 0{,}05$), kommt ein Übungseffekt als Ursache des Niveauunterschiedes beider Untersuchungen nicht in Betracht, da die Werte des zweiten Termins im Durchschnitt niedriger lagen.

In Tabelle 4 sind weiterhin die Ergebnisse zusammengestellt, die bei der Prüfung der Leistungsindizes der verschiedenen Meßgrößen auf ihre Reproduzierbarkeit in den 34 Doppeluntersuchungen erhalten wurden. Während sich für den LPI in den 3 Belastungsbereichen mittelgroße und hoch signifikante Korrelationskoeffizienten errechneten (vgl. BLOHMKE u. Mitarb. 1966), erreichte die Reproduzierbarkeit der LASI-Werte in keinem der Belastungsbereiche ein signifikantes Niveau. Bei den Indexwerten der Atemfrequenz (LAI 50-150) liegt der Korrelationskoeffizient dagegen wieder im Bereich der Reproduzierbarkeit der LPI-Werte.

c) Die Abhängigkeit der bronchomotorischen Arbeitsreaktion vom Ausgangswert

In Abb. 7 (oben) ist das mittlere Verhalten des Pneumometerwertes im Versuchsablauf für drei Teilgruppen dargestellt, die nach der Höhe der Ausgangslage (mittlerer Ruhewert im Sitzen) aufgetrennt wurden. Dabei ergeben sich wesentliche Unterschiede beim Übergang von Ruhe zu Arbeit. Während die Pneumometerwerte bei hoher Ausgangslage (90-120% d.Sollw.) sofort nach Arbeitsbeginn um mehr als 3% abfallen, steigen sie bei niedriger Ausgangslage (40 - 70% d.Sollw.) sprunghaft um einen ähnlich großen Betrag an. Nur bei der mittleren

Tabelle 4

Reproduzierbarkeit der Meßwerte (n = 34)

	LASI	LPI	LAI
Bereich 0 - 100 Watt	$r=+0,10\pm0,17$	$r=+0,48\pm0,14$	
Bereich 50 - 150 Watt	$r=-0,04\pm0,17$	$r=+0,78\pm0,10$	$r=+0,45\pm0,14$
Bereich 100 - 200 Watt	$r=+0,20\pm0,17$	$r=+0,51\pm0,13$	

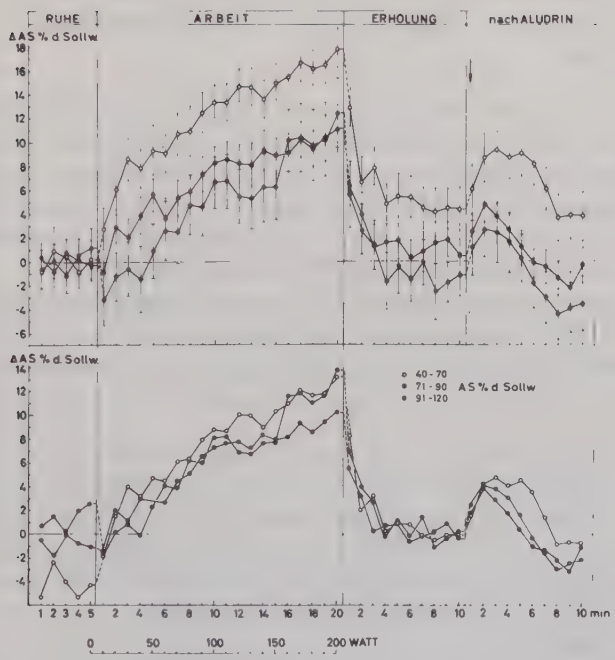

Abb. 7 Mittlere Veränderungen der Pneumometerwerte, dargestellt in drei Gruppen, die nach der Größe der Ausgangslage (40 - 70, 70 - 90 und 90 - 120%d.Sollw.) aufgeteilt wurden, bezogen auf den Ruhemittelwert vor Belastung (oben) und den Mittelwert aus den 5 letzten Erholungswerten (unten). Die eingezeichneten Klammern geben den Bereich des mittleren Fehlers der Mittelwerte an.

Gruppe (70 - 90% d.Sollw.) gehen die Ruhewerte ohne Niveausprung in den quasilinearen Arbeitsanstieg über. Sehr auffällig ist nun, daß sich diese initialen Niveausprünge im Laufe der Erholungszeit nicht wieder ausgleichen, sondern auch noch während der nachfolgenden Aludrin-Reaktion bestehen bleiben.

Gleicht man den bei Arbeitsbeginn entstandenen Niveausprung dadurch aus, daß alle Pneumometerwerte auf das Mittel der letzten 5 Erholungsminuten nach der Belastung bezogen werden (Abb. 7, unten), so zeigt sich, daß der mittlere Verlauf aller drei Gruppen während Belastung, Erholung und Aludrin-Wirkung weitgehend übereinstimmt, während nunmehr die initialen Ruhewerte entsprechende Niveauunterschiede aufweisen. Im Verhalten von Puls- und Atemfrequenz ließ sich im Durchschnitt zwischen den drei genannten Gruppen kein wesentlicher Verlaufsunterschied beobachten.

Zur näheren Prüfung des individuellen Arbeitsverlaufs der Pneumometerwerte in Abhängigkeit von der Ausgangslage untersuchten wir auch die Beziehungen zwischen den Leistungsindizes (LASI) aller drei Belastungsbereiche zu den Ruhewerten von Atemstoß und Vitalkapazität. Die Ergebnisse sind in Abb. 8 in Form von Klassenmittelwerten mit ihren Fehlerbereichen dargestellt.

Hier zeigt sich, daß die Ausgangslage des Pneumometerwertes in Ruhe (Abb. 8, links) die Steilheit der Pneumometerwertzunahme (LASI) in z.T. beträchtlichem und hochsignifikantem Ausmaß beeinflußt. Dies tritt allerdings nur in den Bereichen 0-100 und 100-200 in Erscheinung, wohingegen die LASI 50-150-Werte praktisch keine Abhängigkeit von der Ausgangslage erkennen lassen. Dies spricht dafür, daß der Einfluß vor allem das Verhalten in den ersten und letzten 5 Arbeitsminuten betrifft. Bei einer mittleren Ausgangslage (75 - 85% d.Sollw.) liegen die LASI-Werte für beide Hälften der Belastungszeit am niedrigsten und steigen sowohl zu den höheren als auch zu den niederen Ausgangswerten um das 2- bis 3-fache an. Die niedrigen Ausgangslagen versteilen

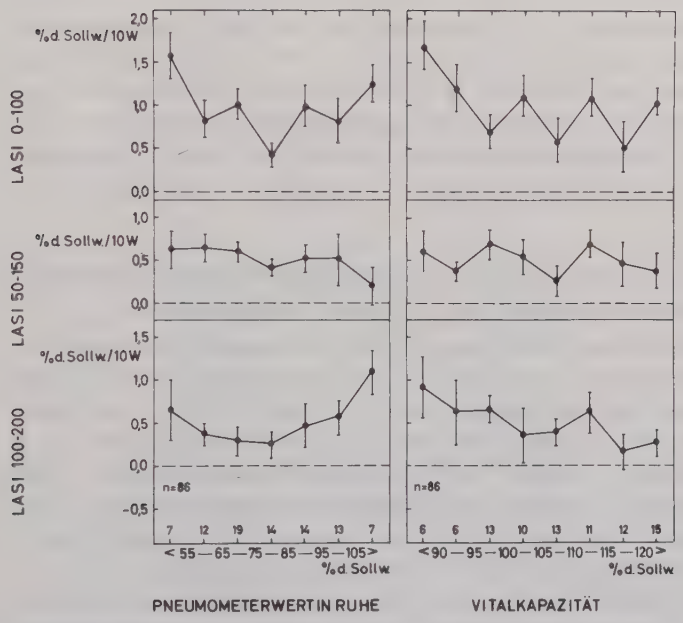

Abb. 8 Die Abhängigkeit der Leistungsindizes des Pneumometerwertes (LASI) in den 3 Belastungsbereichen (0 - 100, 50 - 150 und 100 - 200 Watt) von der Ausgangslage des Pneumometerwertes in Ruhe (links) und der Vitalkapazität (rechts). Klassengröße 10 bzw. 5% d.Sollw. Die Klammern geben den Bereich des mittleren Fehlers der Mittelwerte an.

aber die Pneumometerwertzunahme besonders im unteren Belastungsbereich (LASI 0-100), während eine hohe Ausgangslage des Pneumometerwertes den Leistungsindex besonders im oberen Bereich vergrößert (LASI 100-200). Diese Unterschiede lassen sich auch bei Betrachtung der Abb. 6 bereits erkennen.

Die Ausgangslage der Vitalkapazität in Ruhe beeinflußt die Steilheit der pneumometrischen Arbeitsreaktion offensichtlich ebenfalls nur im frühen und späten Belastungsabschnitt, da die LASI 50-150-Werte keine signifikanten Änderungen aufweisen. Im Bereich 0-100 und 100-200 Watt nehmen die LASI-Werte unterhalb 100% d.Sollw. um mehr als das Doppelte zu.

d) Die Beziehungen der bronchomotorischen Arbeitsreaktion zum Leistungsverhalten von Puls- und Atemfrequenz

Zur Beantwortung der Frage, ob die individuelle bronchomotorische Reaktion bei Arbeit auch bei kontinuierlich steigender Belastung Beziehungen zum Leistungsverhalten von Puls- und Atemfrequenz aufweist, berechneten wir die Korrelationskoeffizienten zwischen entsprechenden Leistungsindizes (LASI, LPI und LAI) in den verschiedenen Belastungsbereichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Dabei ließ sich praktisch keine sichere Beziehung nachweisen. Der zwischen LASI 0-100 und LPI 0-100 gefundene schwach signifikante Korrelationskoeffizient entspricht nicht einmal richtungsmäßig dem von HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) bei stufenweiser Belastung ermittelten Ergebnis. Erwartungsgemäß findet sich lediglich zwischen dem LAI 50-150 und LPI 50-150 eine engere und gut gesicherte positive Beziehung.

Wegen der gefundenen starken Ausgangswertabhängigkeit der pneumometrischen Leistungsindizes (vgl. S. 25) haben wir die Korrelationen der Tabelle 5 auch nach Durchführung entsprechender Korrekturen überprüft, fanden aber sowohl unter Berücksichtigung der Ausgangslage des Pneumometerwertes als auch der Vitalkapazität keine statistisch signifikanten Beziehungen. Dieses negative Ergebnis gilt allerdings nur für die hier behandelten 86 Einzel- bzw. Wiederholungsunter-

Tabelle 5

n = 86	LPI 0-100	LPI 50-150	LPI 100-200	LAI 50-150
LASI 0-100	$r=-0,22\pm0,10$ $p<0,05$	$r=-0,06\pm0,11$	- - - - - -	$r=-0,13\pm0,11$
LASI 50-150	- - - - - -	$r=+0,08\pm0,11$	- - - - - -	$r=\pm0,00\pm0,11$
LASI 100-200	- - - - - -	$r=0,06\pm0,11$	$r=+0,02\pm0,11$	$r=+0,11\pm0,11$
LAI 50-150	- - - - - -	$r=+0,33\pm0,10$ $p<0,001$	- - - - - -	- - - - - -

suchungen an ungeübten Versuchspersonen (vgl. dazu S. 37).

e) Bronchomotorische Arbeitsreaktion und Aludrin-Wirkung

Um die Leistungsindizes des Pneumomterwertes auch im Einzelfall mit der bronchodilatorischen Wirkung der Aludrin-Inhalation vergleichen zu können, bestimmten wir auch die Größe der individuellen Aludrin-Reaktion. Wie Abb. 7 zeigte, konnte als Bezugswert für die Aludrin-Wirkung nicht das Niveau der Ruhewerte vor der Arbeitsbelastung benutzt werden, da mit Arbeitsbeginn z.T. ein sprunghafter Niveauwechsel eintrat, der in der nachfolgenden Erholungsphase nicht wieder ausgeglichen wurde. Wir wählten daher den Durchschnitt der letzten 5 Erholungsminuten und bestimmten die Differenz zum Mittel der beiden höchsten Pneumometerwerte nach Aludrin-Inhalation, um von zufälligen Gipfelwerten unabhängiger zu sein. Abb. 9 zeigt an der Häufigkeitsverteilung der beiden gewerteten Maxima, daß die Aludrin-Reaktion in über 80% der Fälle bereits nach der 5. Minute ihren Höhepunkt überschritten hatte, was gut mit den umfangreicheren Erfahrungen von ROHE (1965) bei gleicher Aludrindosis übereinstimmt. Das trifft auch für die mittlere Größe der Reaktionen (+ 6,84% d.Sollw.) und ihren Streuungsbereich ($\sigma = \pm$ 5,60% d.Sollw.) zu, der in Abb. 10 für unsere 86 Einzeluntersuchungen dargestellt ist. In den Ausgangswertgruppen der Abb. 7 war die Aludrinwirkung auch im Mittel der individuell ausgemessenen Reaktionsgrößen nicht signifikant unterschiedlich.

Außerdem prüften wir die individuelle Reproduzierbarkeit der Aludrinreaktionen an der Korrelation zwischen den 34 Erst- und Zweituntersuchungen, fanden aber -ebenso wie für die Leistungsindizes der Pneumometerwerte - keine signifikante Beziehung ($r = 0{,}07 \pm 0{,}17$).

Der Vergleich der individuellen Aludrin-Reaktionen mit den verschiedenen Leistungsindizes der Pneumometerwerte ergab folgende Korrelationskoeffizienten:

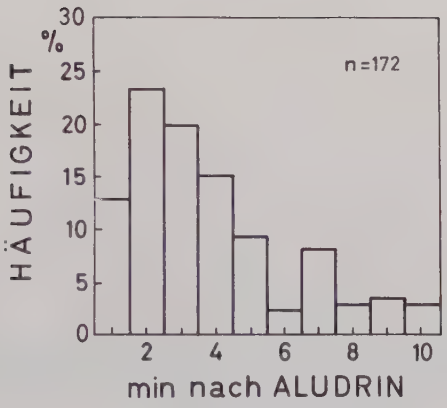

Abb. 9 **Häufigkeitsverteilung der beiden höchsten Pneumometerwerte auf die 10 Meßtermine nach Aludrin-Inhalation bei 86 Untersuchungen.**

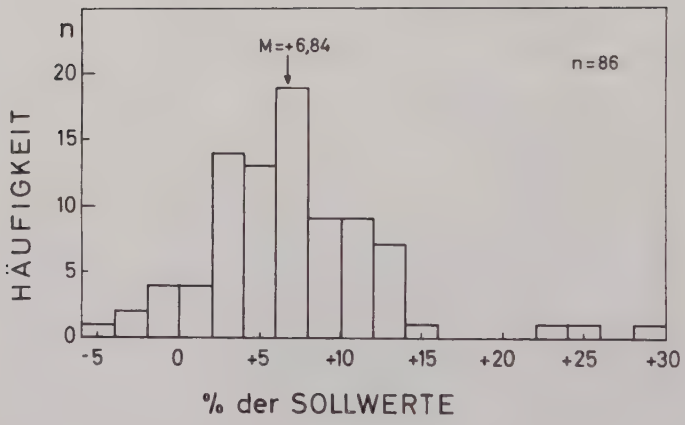

Abb. 10 **Häufigkeitsverteilung der Veränderungen des maximalen Pneumometerwertes nach Aludrin-Inhalation gegenüber dem Mittelwert der letzten 5 Erholungswerte bei 86 Untersuchungen.**

LASI 0-100: $r = +0{,}20 \pm 0{,}10$
LASI 50-150: $r = +0{,}05 \pm 0{,}11$
LASI 100-200: $r = +0{,}09 \pm 0{,}11$

Demnach bestanden keine statistisch gesicherten Beziehungen zwischen der Größe der Aludrinwirkung und der Arbeitsrekation.

f) Zur Frage der Reaktionsbesonderheiten bei Rauchern

Da von den 86 Einzeluntersuchungen 31 an Nichtrauchern, 20 an schwachen Rauchern (bis zu 10 Zigaretten pro Tag) und 35 an starken Rauchern (mehr als 10 Zigaretten pro Tag) vorgenommen wurden (vgl. dazu auch ROHE 1965), war zu prüfen, inwieweit Arbeitsreaktion und Aludrinwirkung von den Rauchgewohnheiten beeinflußt wurden. In Tabelle 6 sind für die genannten drei Gruppen die Mittelwerte der verschiedenen Meß- und Rechengrößen mit ihren Fehlerbereichen zum Vergleich zusammengestellt. Es bestehen zwar in einigen Daten deutliche und z.T. statistisch signifikante Unterschiede, auffallend ist aber, daß die Abweichungen von den Nichtrauchern bis auf eine Ausnahme (LAI 50-150) bei den schwachen Rauchern stärker ausgeprägt sind als bei den starken Rauchern. Bei Zusammenfassung der beiden Rauchergruppen werden die Unterschiede zu den Nichtrauchern weitgehend verwischt. Beim LASI 0-100 sowie in der Größe der Aludrin-Reaktion bestehen von vornherein keine sicheren Differenzen. Insgesamt ergibt sich also, daß die Rauchergewohnheiten keinen systematischen Einfluß auf das Gesamtergebnis haben können.

2. Individuelle Längsschnittbeobachtungen

Abb. 11 gibt zunächst einen Überblick über den Verlauf der verschiedenen Meß- und Rechengrößen, die an den 3 gesunden Versuchspersonen über mindestens 32 Tage bei fast ausnahmslos täglich wiederholten Belastungsprüfungen verfolgt wurden. Die Abbildung enthält neben den einzelnen Meßpunkten der drei Personen auch eine durch übergreifende Dreiermittlung

Tabelle 6

	Alle Untersuchungen		Nichtraucher				Schwache Raucher (bis 10 Zig.tägl.)				Starke Raucher (über 10 Zig.tägl.				Alle Raucher			
	n	M	n	M	σ	σ_M	n	M	σ	σ_M	n	M	σ	σ_M	n	M	σ	σ_M
Vitalkapazität % d.Sollw.	86	107,9	31	108,5	12,4	2,22	20	106,8	11,8	2,64	35	107,9	11,6	1,96	55	107,7	11,7	1,72
Atemstoß % d. Sollw. (Mittelwert 5 Mess.)	86	80,2	31	75,5	16,8	3,20	20	84,4	18,4	4,12	35	80,3	15,8	2,67	55	81,9	17,3	2,34
LASI 0-100	86	+0,93	31	+0,81	0,85	0,15	20	+0,94	0,77	0,17	35	+1,03	0,77	0,13	55	+1,00	0,76	0,10
LASI 50-150	86	+0,51	31	+0,40	0,63	0,11	20	+0,62	0,49	0,11	35	+0,58	0,69	0,13	55	+0,59	0,63	0,08
LASI 100-200	86	+0,45	31	+0,44	0,78	0,14	20	+0,74	0,51	0,11	35	+0,90	0,68	0,12	55	+0,46	0,65	0,09
LAI 50-150	86	+0,57	31	+0,71	0,14	0,03	20	+0,55	0,27	0,06	35	+0,45	0,34	0,06	55	+0,49	0,33	0,04
LPI 50-150	86	4,35	31	4,37	1,13	0,20	20	4,89	0,89	0,20	35	3,95	0,74	0,13	55	4,29	0,97	0,13
Nach Aludrin % d.Sollw.	86	+6,84	31	+6,99	4,29	0,77	20	+6,39	6,95	1,56	35	+6,93	7,20	1,22	55	+6,76	7,10	0,96

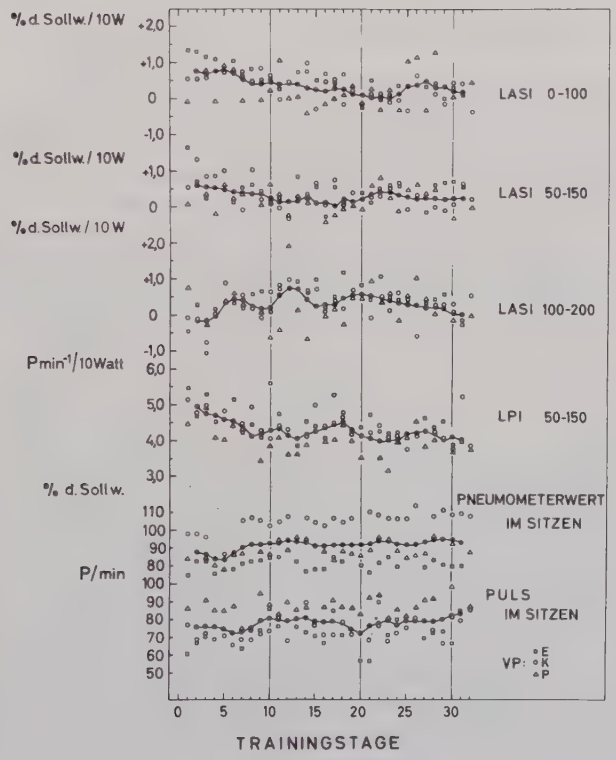

Abb. 11 Der Verlauf der verschiedenen Leistungsindizes des Pneumometerwertes (LASI 0-100, LASI 50-150 und LASI 100-200), des Leistungspulsindex für den Bereich 50 - 150 Watt (LPI 50-150),der Ruhepneumometerwerte im Sitzen (Mittelwert aus 5 Messungen) sowie der Pulsfrequenz im Sitzen von 3 geübten Versuchspersonen bei täglicher Kontrolle. Die Mittelwertskurven sind durch übergreifende Dreiermittlung einmal geglättet.

einmal geglättete Mittelwertskurve, um den Trend deutlich zu machen. Zum Vergleich mit den 86 Einzeluntersuchungen (Tabelle 3) sind in Tabelle 7 für jeden der drei Probanden die Mittelwerte der Meßgrößen mit ihren Streuungsbereichen zusammengestellt. Letztere wurden ohne Ausgleich des bestehenden Trends ermittelt.

Bei allen drei Versuchspersonen sinkt der Leistungspulsindex (LPI 50-150) infolge des zu erwartenden Trainingseffektes mit einem sich abflachenden Gefälle fortlaufend ab, wobei allerdings wellenförmige Schwankungen auftreten, an denen alle Probanden gemeinsam beteiligt sind.

Von den LASI-Werten zeigen die im Bereich von 0 - 100 und 50 - 150 Watt einen im großen und ganzen ähnlichen Rückgang, wobei allerdings die z.T. überlagerten wellenförmigen Schwankungen nicht sicher korrespondieren. Im Bereich zwischen 100 und 200 Watt steigen die LASI-Werte dagegen mit stärkeren Schwankungen besonders in der ersten Hälfte der Beobachtungszeit an. Die im Leistungspulsindex deutliche Trainingswirkung der wiederholten Arbeitsbelastungen führen demnach im unteren Belastungsbereich zu einer Verminderung der bronchomotorischen Arbeitsreaktion, während diese im oberen Belastungsbereich eine Steigerung erfährt. Übungseffekte bei der Ausführung des Atemstoßes dürften an diesen Veränderungen kaum beteiligt sein, da die Zunahme des Ruhe-Pneumometerwertes im Sitzen erst nach einer wellenförmigen Senke während der ersten Beobachtungswoche eintritt und sich dann schwach über die ganze Beobachtungszeit hin fortsetzt. Die Ruhepulsfrequenz zeigt wider Erwarten eine leicht ansteigende Tendenz.

Wir prüften die Beziehungen zwischen den verschiedenen Leistungsindizes für jeden der drei Probanden durch Berechnung der Korrelationskoeffizienten. Diese sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Allen drei Probanden gemeinsam ist eine positive Beziehung zwischen dem Leistungspulsindex (LPI 50-150) und dem Leistungsindex der bronchomotorischen Reaktion im Bereich zwischen 0 und 100 Watt

Tabelle 7

	E.			K.			P.		
	n	M	σ	n	M	σ	n	M	σ
LASI 0-100	26	+0,57	0,46	28	+0,31	0,37	29	+0,30	0,52
LASI 50-150	26	+0,49	0,37	28	+0,36	0,41	29	+0,19	0,35
LASI 100-200	26	+0,29	0,50	28	+0,23	0,43	29	+0,22	0,54
LPI 50-150	26	4,44	0,47	28	4,36	0,43	29	3,99	0,45

Tabelle 8

	E.	K.	P.
LASI 0-100/LPI 50-150	$r=+0,45\pm0,16$ $p < 0,001$	$r=+0,29\pm0,18$	$r=+0,45\pm0,15$ $p < 0,005$
LASI 50-150/LPI 50-150	$r=+0,10\pm0,18$	$r=+0,52\pm0,14$ $p < 0,001$	$r=-0,13\pm0,18$
LASI 100-200/LPI 50-150	$r=-0,37\pm0,17$ $p < 0,05$	$r=+0,25\pm0,18$	$r=+0,01\pm0,19$

(LASI 0-100). Diese ist jedoch nur bei zwei der Probanden gut gesichert. Die dritte Versuchsperson (K.) zeigte diese positive Korrelation dafür hoch signifikant für den Bereich 50-150 Watt, der sich z.T. mit dem Bereich 0-100 überdeckt. Die Beziehungen in den späteren Belastungsabschnitten sind sonst uneinheitlich, sowohl hinsichtlich ihrer Ausprägung als auch sogar der Richtung nach.

IV. D i s k u s s i o n

1. Zur Methodik

a) Die Eignung der Pneumometrie zur Erfassung der bronchomotorischen Arbeitsreaktion

Da die Pneumometrie nur die maximale Exspirationsstromstärke erfaßt, die während des gesamten Ausatmungsstoßes nur für eine sehr kurze Zeit erreicht wird, scheint es zur Beurteilung unserer Ergebnisse wichtig, direkte Vergleichsuntersuchungen mit spirographischer Atemstoßmessung, wie sie von HILDEBRANDT u. PÖLLMANN (1966) mitgeteilt wurden, heranzuziehen (vgl. FRITZ 1965). Abb. 12 zeigt das mittlere Verhalten von 20 gesunden Versuchspersonen, die auf dem Fahrradergometer stufenweise mit 30, 60, 90 und 120 Watt belastet wurden. Nach der 5. Arbeitsminute wurde jeweils 5mal in bequemen Abständen der Atemstoß mit dem Pneumometer MINIMUS gemessen und zweimal der Atemstoßtest nach TIFFENEAU u. PINELLI (1948) mit dem Lungenfunktionsgerät nach BUHR u. OSTEN (1963) registriert. Während der Pneumometerwert gut linear mit der Leistung und auch mit der Pulsfrequenz ansteigt, nimmt die exspiratorische 1-sec-Kapazität nach TIFFENEAU zwar bei 30 Watt sprunghaft zu, um dann jedoch bei den höheren Belastungsstufen nur noch gering weiter anzusteigen. Als Grund für ein solches abweichendes Verhalten konnte vermutet werden, daß der gleichbleibende relativ große Zeitbedarf für den TIFFENEAU-Test die Probanden bei höherer Atemfrequenz und Dyspnoe zunehmend in Schwierigkeiten bringt, was besonders im späteren Teil der Ausatmungskurve stören muß. Wird dementsprechend die Auswertung des Atemstoßes nur auf die exspiratorische Kapazität der ersten Halbminute oder gar nur der ersten Viertelminute beschränkt, so ergibt sich - wie Abb. 14 zeigt - in der Tat eine zunehmend lineare Beziehung zu Belastungsgrad und Pneumometerwert. Daraus darf geschlossen werden, daß die Pneumometrie mit Messung der maximalen Exspirationsstromstärke zur Untersuchung der bronchomotorischen Arbeitsreaktion besser geeignet ist als spirographische Verfahren, zumal noch der Vorteil einer geringeren Störung des Arbeitsablaufs selbst hinzukommt.

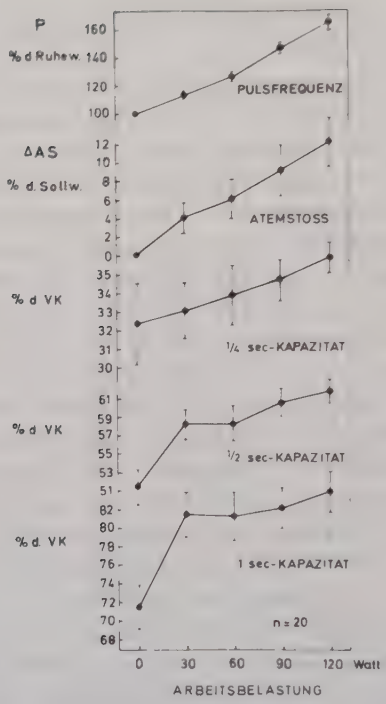

Abb. 12 Das Verhalten von Pulsfrequenz, Pneumometerwert beim Atemstoß, der exspiratorischen Kapazität nach TIFFENEAU für 1/4, 1/2 und 1 Sekunde bei 20 Versuchspersonen in Abhängigkeit von der Belastung bei steady-state-Arbeit auf dem Fahrradergometer (nach HILDEBRANDT u. PÖLLMANN 1966).

b) Zur Auswertung der pneumometrischen Meßwerte

Erfahrungsgemäß zeigen die Pneumometerwerte bei mehrfach wiederholter Messung eine nicht unbeträchtliche Schwankungsbreite, die z.T. auf Schwankungen der Atemstoßtechnik sowie des Leistungswillens, z.T. aber möglicherweise auch auf Spontanschwankungen der Atemwiderstände zurückzuführen sind. Nach HILDEBRANDT u. ROHE (1964) nimmt die Erwartungswahrscheinlichkeit für ein neues Maximum in einer Meßreihe etwa gemäß der Formel $\frac{100}{n}$ % (n = Anzahl der Meßtermine) ab, wobei im allgemeinen 5 Einzelmessungen zur Erfassung der maximalen Exspirationsstromstärke als ausreichend angesehen werden (Lit.-Übersicht s. ROHE 1965).

Aus diesen Voraussetzungen ist abzuleiten, daß mit 1-minütlichen Einzelmessungen bei zunehmender Arbeitsbelastung keine Veränderungen des jeweils möglichen Maximalwertes verfolgt werden können, sondern nur ein durchschnittliches Verhalten zur Darstellung kommt, das mit einer größeren Streuung als die echter Maximalwerte behaftet sein muß. Gegenüber dem recht gleichmäßigen Anstieg der Pulszahl kann daher die Berechnung der entsprechenden Regression aus den z.T. recht unregelmäßig zunehmenden Pneumometerwerten bei Belastung zu stärkeren Unsicherheiten führen. So würde z.B. in einer Reihe von 10 ansteigenden Pneumometerwerten die als Regression bestimmte Steilheit wesentlich geringer ausfallen, wenn der höchste Wert zufälligerweise nicht als 10., sondern bereits als 8. Wert der Reihe auftritt, und umgekehrt.

Um auszuschließen, daß solche Zufälligkeiten das Ergebnis unserer Untersuchungen beeinträchtigt haben, wurden sämtliche Indexwerte zur Kontrolle auch als Differenz zwischen den Schwerpunkten der ersten und zweiten 5 Einzelmeßwerte jedes Belastungsbereiches berechnet. Der Vergleich dieser Indizes mit den nach der Formel von MÜLLER (1962)(vgl.S.13) errechneten Regressionen ergab aber eine sehr gute Übereinstimmung; die Korrelationskoeffizienten betrugen für LASI 0-100 $r = + 0{,}92 \pm 0{,}02$, für LASI 50-150 $r = + 0{,}92 \pm 0{,}02$ und für LASI 100-200 $r = + 0{,}91 \pm 0{,}02$. Darüber hinaus wurden auch sämtliche Korrelationen zwischen den LASI-Werten und

den anderen Leistungsindizes überprüft, wobei sich aber keine wesentlichen Veränderungen unserer Ergebnisse feststellen ließen.

c) Leistungswille und Leistungsfähigkeit der Versuchspersonen

Die Pneumometrie ist, wie andere Verfahren der Messung forcierter Atemgrößen, mit in erster Linie vom Leistungswillen der Versuchspersonen abhängig. Während körperlicher Arbeit stellt die Ausführung des Atemstoßes zusätzliche Ansprüche an den Leistungswillen und wird zugleich auch zunehmend vom Leistungsvermögen des Probanden abhängig. Insofern überrascht es zwar nicht, daß unsere Ergebnisse an einer Gruppe ungeübter Versuchspersonen in mancher Hinsicht von denen abweichen, die bei drei geübten Probanden in individuellen Längsschnittuntersuchungen gewonnen wurden. Vor allem die minimale Reproduzierbarkeit der pneumometrischen Arbeitsreaktionen bei den 34 Zweituntersuchungen fordert aber eine nähere Prüfung, inwieweit Leistungsfähigkeit und Leistungswille bei den Probanden vorausgesetzt werden können. Aus der unmittelbaren Beobachtung ihres Verhaltens ergaben sich allerdings in keinem Falle Hinweise auf mangelnde Leistungsbereitschaft.

Abb. 13 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Vitalkapazität (Maximum aus 3 Messungen), des Pneumometerwertes in Ruhe (Maximum aus 5 Messungen) sowie der daraus errechneten VK-Zeiten (HILDEBRANDT u. HANKE 1956) bei den 52 Erstuntersuchungen. Im Vergleich zu den von HILDEBRANDT (1963) mit gleicher Methodik an gesunden Studenten ermittelten Verteilungen von Vitalkapazität und Pneumometerwert liegen unsere Mittelwerte nur um 8,2 bzw. 9,9% d.Sollw. niedriger. Der Streuungsbereich der Vitalkapazität ist bei unseren Probanden weniger breit, insbesondere kommen keine Werte unter 80% d.Sollw. vor. Die Verteilung der Pneumometerwerte erstreckt sich allerdings im Vergleich zu den Studenten stärker in den Bereich erniedrigter Werte. Demzufolge findet sich auch

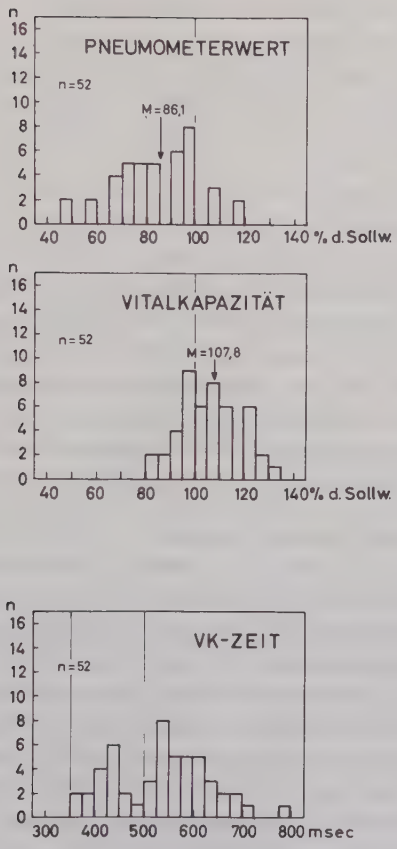

Abb. 13 **Häufigkeitsverteilungen von Pneumometerwert (Maximum aus 5 Messungen), Vitalkapazität (Maximum aus 3 Messungen) und VK-Zeit bei 52 Erstuntersuchungen im Sitzen.**

bei den VK-Zeiten ein weitaus größerer Anteil von Werten, die über den eingetragenen Normbereich (350 - 500 msec) hinausgehen (vgl. HILDEBRANDT u. HANKE 1956). Es ist aber auch von anderer Seite mehrfach darauf hingewiesen worden, daß der von HILDEBRANDT u. HANKE (1956) bei Kurpatienten gefundene Normalbereich der VK-Zeit zu niedrig angesetzt ist (ZEHNDER 1960; FABEL u. HAMM 1962; LEONARDS 1966; BÖRNGEN 1967; u.a.).

Mangelhafte Einführung in die Technik der Atemstoßmessung kann jedenfalls nicht die Ursache für die z.T. erheblich erniedrigten Pneumometerwerte in Ruhe sein. Das geht daraus hervor, daß die 5 Ruhewerte vor der Belastung (vgl. Abb. 2) keinen systematischen Übungsanstieg mehr zeigen. Von besonderer Bedeutung für den Ausschluß mangelhaften Leistungswillens ist aber der Nachweis, daß die Reproduzierbarkeit der Ruhewerte von Vitalkapazität und Pneumometerwert bei den 34 Wiederholungsuntersuchungen sehr gut war (vgl. S.25).

Eine weitere Beurteilungsmöglichkeit für die Sicherheit der Ruhepneumometerwerte ergibt sich durch einen Vergleich des individuellen Maximalwertes mit dem Mittel der 5 zugrunde gelegten Einzelmessungen in Ruhe. CUNTZE (1965) fand bei gut geübten Studenten eine Differenz von + 3,9% d.Sollw. In unserer Gruppe lag dieser Unterschied mit im Mittel + 4,6% d.Sollw. nur unwesentlich höher, wobei die Korrelation zwischen Mittel- und Maximalwerten mit $r = + 0{,}96 \pm 0{,}01$ fast ideal war. Schließlich kann auch darauf verwiesen werden, daß das Niveau der Pneumometerwerte am Ende der Erholungsphase nicht absank, sondern teilweise sogar höher lag als das Ausgangsniveau (vgl. Abb. 2). Aufgrund dieser Befunde kann bei unseren ungeübten Versuchspersonen fehlender Leistungswille als Störfaktor mit großer Sicherheit ausgeschlossen werden.

Die in Abb. 13 dargestellten Häufigkeitsverteilungen lassen außerdem den Schluß zu, daß bei den untersuchten Probanden keine restriktiven Ventilationsstörungen vorlagen, da in

keinem Falle Werte der Vitalkapazität unter 80% d.Sollw. und VK-Zeiten unter 350 msec gemessen wurden. Dagegen ist bei einem Teil der Probanden mit obstruktiven Ventilationsstörungen zu rechnen, da teilweise beträchtlich erniedrigte Pneumometerwerte vorkamen, die zu entsprechend erhöhten VK-Zeiten führten. Der hohe Anteil von Rauchern dürfte dafür nicht allein verantwortlich sein, da ROHE (1965) an einem umfangreicheren Kollektiv die Pneumometerwerte von Rauchern gegenüber Nichtrauchern nur um wenige Prozent erniedrigt fand und auch in unserer Gruppe keine signifikanten Abweichungen der Raucher festzustellen waren. Obwohl wir durch anamnestische Befragung versucht haben, keine Versuchspersonen mit Luftwegsinfektion zur Untersuchung zuzulassen, war es infolge der z.T. dissimulierenden Angaben nicht zu vermeiden, daß in ca. 10% der Fälle die Probanden erst nachträglich eine "Erkältung" einräumten. In zwei Fällen trat z.B. während der Untersuchung ein starker Hustenreiz auf.

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit unserer Versuchspersonen können die in Abb. 5 für alle drei Belastungsbereiche zusammengestellten Leistungspulsindizes herangezogen werden. Vergleichsmöglichkeiten sind allerdings nur für den LPI 0-100 gegeben, da nur für diesen als Leistungspulsindex n. MÜLLER (1950, 1962) gruppenstatistische Untersuchungen in der Literatur vorliegen. In Abb. 5 (oben) ist die von MÜLLER (1962) an 1170 gesunden Männern gefundene Häufigkeitsverteilung miteingezeichnet. Der Vergleich zeigt, daß unsere Probanden durchweg etwas erhöhte LPI-Werte aufwiesen. Dies ist insofern bemerkenswert, als es sich fast ausschließlich um Soldaten nach Abschluß der Grundausbildung handelte, bei denen nach HOLLMANN (1967) ein guter Trainingszustand zu erwarten wäre. Der Unterschied kann nicht darauf beruhen, daß die Regression in unserem Falle abweichend von MÜLLER (1962) erst ab 20 Watt berechnet wurde; durch die Gefahr initialer Pulsüberhöhungen wäre eher ein gegenteiliger Fehler zu erwarten. Es ist aber zu bedenken, daß die wiederholte Ausführung

des Atemstoßes während der Arbeit eine zusätzliche Belastung darstellt, die auch das Pulsverhalten entsprechend beeinflussen muß.

Die Ruhepulsfrequenz lag bei unseren Probanden im Durchschnitt zwar deutlich unter dem Normwert von 72/min (HILDEBRANDT 1960 b), erreichte mit 64,4 ± 9,4/min jedoch nicht den Bereich von Hochleistungssportlern (KIRCHHOFF 1963: 50/min). Auch die Blutdruckwerte in Ruhe ließen mit systolisch 119,2 ± 9,0 mm Hg und diastolisch 73,3 ± 9,2 mm Hg nicht auf einen besonders schlechten Trainingszustand schließen, wenn man sie mit den von KIRCHHOFF (1963) bei Hochleistungssportlern ermittelten Werten vergleicht (118 ± 8,0 mm Hg bzw. 67 ± 6,7 mm Hg) (vgl. dazu auch MELLEROWICZ 1962).

2. Zu den Ergebnissen

Von den in der Literatur vorliegenden Untersuchungen über die bronchomotorische Arbeitsreaktion (OTTO 1937; STEIGER u. HADORN 1946; HÄUSLER u. JULICH 1960; u.a.) können nur die von HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) zum Vergleich mit unseren Ergebnissen herangezogen werden (vgl. auch CUNTZE 1965), weil diese allein mit dosierter Körperarbeit durchgeführt wurden. Der von uns festgestellte mittlere Verlauf des Pneumometerwertes stimmt im Bereich zwischen 0 und 100 Watt in seinem linearen Anstieg gut mit den Beobachtungen von HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) überein, die bei stufenweiser Belastungssteigerung im steady state gleichfalls eine lineare Beziehung zwischen Leistung und Pneumometerwert fanden. Die mittlere Steilheit der Pneumometerwertsteigerung (LASI 0-100) ist bei unseren Probanden mit 0,93% d.Sollw./10 Watt praktisch gleich groß (0,8%), wenn man berücksichtigt, daß HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) den Gradienten auf den Ausgangswert im Liegen bezogen und nicht in % d.Sollw. angegeben haben, was zu einer Verminderung um ca. 20% führt. Auch die Häufigkeit negativer Leistungsindizes in diesem Belastungsbereich paßt mit 14% (vgl. Abb. 4)

größenordnungsmäßig zu den Erfahrungen von HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965), die unter 11 Probanden eine negative Reaktion (bei einem trainierten Leistungssportler) sahen.

Während diese Autoren aber auch bei erschöpfenden Belastungen bis zu 150 Watt unter steady state-Bedingungen einen weiterhin linearen Anstieg des Pneumometerwertes beobachten konnten, fanden wir bei kontinuierlicher Leistungssteigerung im Bereich zwischen ca. 100 und 150 Watt (entsprechend der 10. bis 15. Arbeitsminute: vgl. Abb. 2) eine Zone, in der im Mittel kein weiterer Anstieg der Pneumometerwerte erfolgte. Erst oberhalb 150 Watt setzte dieser erneut ein. Dieser Unterschied ist durchaus zu erwarten. HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) beobachteten nämlich, daß die Einstellung eines steady state der Pneumometerwerte bei den höheren Belastungsstufen immer mehr Zeit erforderte, so daß z.B. bei 120 Watt die endgültige Einstellung erst zwischen 20 und 30 min erfolgt war. In den unteren Belastungsstufen zeigten sich dagegen initial überschießende Reaktionen. Bei kontinuierlicher Belastungssteigerung scheint bei etwa 100 Watt die Grenze erreicht zu sein, von der ab die Pneumometerwertsteigerung zunehmend zeitlich zurückbleibt. Daraus ergibt sich zugleich, daß dem ab 150 Watt einsetzenden weiteren Anstieg der Pneumometerwerte sehr wahrscheinlich ein anderer Steuerungsmechanismus zugrundeliegt als im Bereich zwischen 0 und 100 Watt. Hierfür konnten aus unseren Beobachtungen über den Zeitpunkt, an dem die Probanden sichtbaren Schweißausbruch an der Stirn zeigten und zu kontinuierlicher Mundatmung übergingen, weitere Anhalte gewonnen werden.

Im Durchschnitt lagen beide Zeitpunkte dicht zusammen (15,9 bzw. 15,1 min nach Arbeitsbeginn). Von den 68 Fällen, bei denen sichtbarer Schweißausbruch auftrat, betrug der Abstand zwischen beiden Ereignissen in 25 Fällen nicht mehr als 1 min, in 37 Fällen nicht mehr als 3 min. In Abb. 14 ist der mittlere Verlauf des Pneumometerwertes sowie der Atemfrequenz dieser 68 Einzeluntersuchungen während 6 min

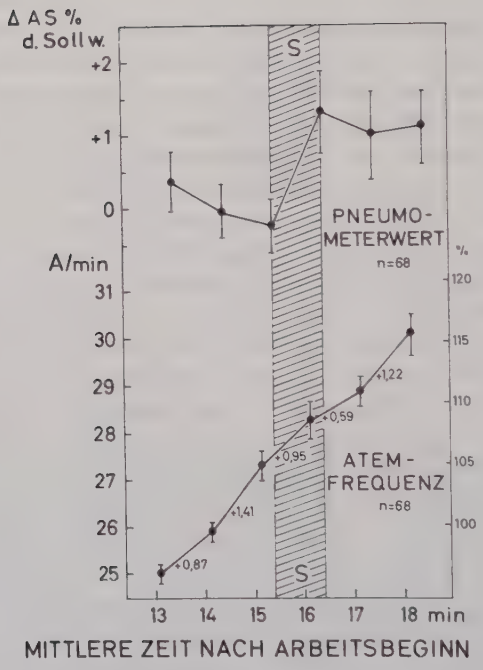

Abb. 14 Der mittlere Verlauf von Pneumometerwert und Atemfrequenz bei 68 Einzeluntersuchungen während kontinuierlich ansteigender Belastung (10 Watt/min) bei Synchronisation über dem Beginn des sichtbaren Schwitzens an der Stirn (S). Die Klammern geben den Bereich des mittleren Fehlers der Mittelwerte an. Die Zahlen an der Kurve der Atemfrequenz geben die Steilheit der Frequenzzunahme pro Minute an.

zusammengefaßt, und zwar über derjenigen Minute synchronisiert, in der der sichtbare Schweißausbruch an der Stirn auftrat. Dabei zeigt sich, daß der Pneumometerwert im Mittel vor dem Schweißausbruch sogar eine rückläufige Tendenz besitzt, im Zeitraum des Schweißausbruchs dagegen sprunghaft überschießend ansteigt ($p < 0{,}03$). Die Atemfrequenz läßt in der Vorphase des Schweißausbruches eine beträchtliche Versteilung ihres Anstiegs erkennen. Im Bereich der sprunghaften Pneumometerwertzunahme nimmt ihre Steilheit jedoch vorübergehend so stark ab, daß die Mittelwerte der Arbeitsminuten sich nicht mehr statistisch sicher voneinander abheben. Erst in der zweiten Minute nach dem Schweißausbruch nimmt die Atemfrequenz innerhalb einer Arbeitsminute wieder signifikant zu. Der entsprechend synchronisierte Verlauf der Pulsfrequenz ließ dagegen keinerlei Schwankungen in diesem Bereich erkennen.

Auch bei einer Synchronisation der Pneumometerwerte über dem Zeitpunkt des Auftretens kontinuierlicher Mundatmung fand sich ein ganz ähnlicher signifikanter Sprung ($p < 0{,}01$), der sich allerdings über 2 min erstreckte, was bei der Schwierigkeit der Festlegung eines solchen Termins verständlich ist. Auch wenn man berücksichtigt, daß der Schweißausbruch von den thermischen Raumbedingungen abhängig ist, die nicht absolut konstant waren, spricht der beobachtete zeitliche Zusammenhang dafür, daß regulatorische Vorgänge, die den Schweißausbruch an der Stirn herbeiführen, zugleich die vorher stagnierende Bronchodilatation erneut in Gang bringen und dadurch die Ventilationsbedingungen so verbessern, daß die zunehmende Steilheit der Atemfrequenzsteigerung zumindest vorübergehend abfallen kann.

Wir vermuten, daß die geschilderten Vorgänge in enger Beziehung zur Überwindung des sogenannten Toten Punktes stehen (second wind). Dafür spricht, daß in den Längsschnittuntersuchungen an 3 geübten Versuchspersonen, unter denen sich auch der Verfasser befand, das subjektive Überwinden eines Toten Punktes vor Ausbildung der Trainingseffekte in

dem betreffenden Zeitbereich in engerem Zusammenhang mit Schweißausbruch und Beginn kontinuierlicher Mundatmung beobachtet wurde. Im weiteren Verlauf trat bis zur 20. Arbeitsminute kein Toter Punkt mehr auf. Inwieweit der sprunghafte Anstieg des Pneumometerwertes beim Toten Punkt die Vorstellung stützen kann, daß der second wind auf einer Adrenalinausschüttung beruht (Lit.-Übersicht s. HOLLMANN 1959), kann aufgrund unserer Daten natürlich nicht entschieden werden. Es ist aber darauf hinzuweisen, daß auch für den Schweißausbruch eine adrenerge Steuerung in Betracht kommt (Lit.-Übersicht s. FIEDLER 1955).

Der im Mittel schnelle Rückgang der Pneumometerwerte nach Arbeitsende (vgl. Abb. 2) entspricht gut den Erfahrungen von HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) sowie von STEIGER u. HADORN (1946).

Die Reproduzierbarkeit der bronchomotorischen Arbeitsreaktion ist bisher nicht direkt geprüft worden. Da aber HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) ihre Untersuchungen mit einzelnen Belastungsstufen unter Ausschluß möglicher Trainingseffekte zu verschiedenen Terminen durchgeführt haben, läßt sich aus der von ihnen gefundenen guten Linearität zur Belastung auf eine wesentlich bessere Reproduzierbarkeit schließen, als sie in unseren Versuchen mit kontinuierlicher Leistungssteigerung gefunden wurde. Die von diesen Autoren festgestellte enge positive Beziehung zwischen der Steilheit der bronchomotorischen Reaktion und der des Pulsanstiegs dürfte daher in unserem Material in erster Linie deswegen fehlen, weil die LASI-Werte in allen Leistungsbereichen ungenügend reproduzierbar waren, zumal der Leistungspulsindex eine hinreichende Reproduzierbarkeit zeigte. Grundsätzlich dürfte bei dem besprochenen Verhalten der Pneumometerwerte eine solche Beziehung zum Leistungspulsindex auf den unteren Belastungsbereich (0-100 Watt) beschränkt bleiben. Dementsprechend ließ sich auch in unseren Längsschnittuntersuchungen an Geübten die positive Korrelation zwischen LASI und LPI bei allen drei Versuchspersonen auffinden.

Der Einfluß der Ausgangslage auf die bronchomotorische Arbeitsreaktion stellt sich bei kontinuierlicher Leistungssteigerung wesentlich anders dar als bei den Untersuchungen von HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) unter steady state-Bedingungen. Während diese Autoren eine nur schwache negative Beziehung zwischen dem Ausgangswert des Atemstoßes im Sitzen und der Pneumometerwertsteigerung während Arbeit fanden, ergab sich in unserem Material (vgl. Abb. 8) ein statistisch signifikanter, aber komplizierterer Einfluß des Ausgangswertes, wobei die Arbeitsreaktionen sowohl bei niedrigen als bei hohen Ausgangslagen gegenüber einem mittleren Ausgangsbereich stark zunahmen. Da bei HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) nur wenige Ausgangswerte des Atemstoßes unter 80% lagen, ist die Divergenz der Befunde nicht nur eine quantitative, sondern auch eine qualitative. Der Unterschied kann nicht auf Differenzen in der Ausgangslage der Vitalkapazität zurückgeführt werden, da diese nach unseren Feststellungen praktisch keinen selbständigen Einfluß auf die bronchomotorische Arbeitsreaktion besitzt.

HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) fanden darüber hinaus eine hochsignifikante positive Abhängigkeit der bronchomotorischen Arbeitsreaktion vom Pulsfrequenzniveau in Ruhe. Auch diesen Befund konnten wir bei kontinuierlicher Leistungssteigerung nicht bestätigen, und zwar auch dann nicht, wenn die LASI-Werte aller drei Belastungsbereiche in Bezug auf den Einfluß der Ausgangslage des Pneumometerwertes korrigiert wurden.

3. Zum Mechanismus der bronchomotorischen Arbeitsreaktion

Der von STEIGER u. HADORN (1946) und anderen Autoren angenommene Mechanismus einer Adrenalinausschüttung als Grundlage der Pneumometerwertzunahme bei Arbeit wurde von HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) vor allem auch deswegen abgelehnt, weil der bronchodilatorische Effekt einer Aludrin-Inhalation mit optimaler Dosis wesentlich geringer sei als die Arbeitsreaktion bei einer Belastung bis zu 120 Watt. Die

Autoren zogen zum Vergleich Ergebnisse heran, die von HILDEBRANDT u. ROHE (1964) beim Aludrin-Inhalationstest an gesunden Studenten gewonnen waren. Die Steigerung des Pneumometerwertes hatte dabei im Mittel 3,9% d.Sollw. betragen.

Dieses Verhalten kann von uns nun auch beim direkten Vergleich von Aludrin-Effekt und Arbeitsreaktion bestätigt werden. Wie Abb. 2 und 7 sowie Tabelle 2 erkennen lassen, wird die Größe der Aludrin-Wirkung im Mittel bereits in der 5. Arbeitsminute (entsprechend 50 Watt Belastung) überschritten. Zur besseren Absicherung haben wir zusätzlich die inidividuellen Pneumometerwert-Maxima nach Aludrin-Inhalation mit den maximalen Pneumometerwerten der 9. bis 11. Arbeitsminute (90-110 Watt) verglichen. Dabei lagen die Arbeitswerte im Mittel um 3,2 $\pm$ 0,73% d.Sollw. höher als die Aludrin-Maxima. Der Unterschied war mit $p < 0{,}001$ hochsignifikant. Die von uns erzielte Aludrin-Wirkung war im Mittel mit + 6,8% d.Sollw. sogar noch beträchtlich größer als bei den Untersuchungen von HILDEBRANDT u. ROHE (1964).

Unsere Befunde sprechen demnach gleichfalls dafür, daß der lineare Anstieg der Pneumometerwerte im Bereich bis zu etwa 100 Watt nicht auf eine Adrenalinausschüttung zurückgeführt werden kann, zumal die bronchodilatierende Wirkung von Aludrin größer ist als die des Adrenalins (KONZETT u. RÖSSLER 1940; Lit.-Übersicht s. ROHE 1965).

Auf der anderen Seite lassen unsere Ergebnisse aber auch erkennen, daß die von HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) angenommene nervöse Steuerung der bronchomotorischen Arbeitsreaktion nicht der einzige Mechanismus sein kann, sondern vorwiegend für den Belastungsbereich bis zu etwa 100 Watt in Betracht kommt, in dem auch bei kontinuierlicher Leistungssteigerung ein gut linearer Zuwachs der Pneumometerwerte erfolgt.

Oberhalb von 100 Watt läßt sich das Stagnieren der Pneumometerwertsteigerung zwar zunächst noch im Einklang mit den

Befunden von HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) damit erklären, daß die Einstellung des steady state bei höherer Belastung immer größere Zeiträume beansprucht. Das sprunghafte Wiedereinsetzen der Steigerung in zeitlichem Zusammenhang mit Schweißausbruch und Mundatmung (vgl. S. 50, Abb. 14) zeigt aber, daß hier - wahrscheinlich im Rahmen des second wind - zusätzliche Mechanismen aktiviert werden (vgl. dazu CHIANG u. Mitarb. 1965). Ob hierfür eine Adrenalinausschüttung als Ursache in Betracht kommt, kann freilich noch nicht entschieden werden. Unsere Prüfung, ob die individuelle Ansprechbarkeit auf die Aludrin-Inhalation in quantitativer Beziehung zur Steilheit der mit dem Schweißausbruch einhergehenden Pneumometerwertsteigerung steht, erbrachte jedenfalls kein signifikantes Ergebnis.

In jüngerer Zeit ist durch die Aufdeckung reziproker Beziehungen zwischen Lungenvolumen und Strömungswiderstand der Luftwege (Lit.-Übersicht s. BRISCOE u. DUBOIS 1958) die Frage aufgeworfen worden, inwieweit die Zunahme des Pneumometerwertes bei Arbeit rein mechanisch durch eine Erhöhung des Lungenvolumens hervorgerufen werden kann.

Zunächst ist dabei zu bedenken, daß der Atemstoß immer aus möglichst maximaler Inspirationsstellung heraus ausgeführt wird. Wie auch der Vergleich mit dem TIFFENEAU-Test während Arbeit zeigt (vgl. Abb. 12), wird die maximale Exspirationsstromstärke schon in einem sehr frühen Abschnitt des Exspirationsstoßes erreicht. Bei zunehmender Arbeitsbelastung wäre daher zu erwarten, daß der Proband infolge der Arbeitsdyspnoe den Atemstoß nicht mehr aus maximaler Inspirationsstellung heraus beginnt, was eher zu einem Absinken der Pneumometerwerte führen müßte. Umgekehrt müßte sich ein Trainingserfolg in einer Steigerung der Pneumometerwertzunahme bei Arbeit anzeigen, da der Trainierte seine Atemfrequenz zugunsten der Atemtiefe weniger steigert (Lit.-Übersicht s. HOLLMANN 1959). Obwohl die Abnahme der Arbeitsatemfrequenz auch in unseren Längsschnittuntersuchungen deutlich war, zeigten die LASI-Werte im Bereich

bis zu 150 Watt trotzdem eine abfallende Tendenz.

In neueren Untersuchungen fanden CHIANG u. Mitarb. (1965), daß der nicht-elastische Lungenwiderstand bei Arbeitsbelastung trotz des erhöhten Atemvolumens nicht signifikant ansteigt, so daß auf eine etwa proportionale Zunahme der Bronchialweite geschlossen werden muß. WIDDICOMBE u. NADEL (1963) waren schon aufgrund theoretischer Überlegungen zu dem Schluß gekommen, daß die nervöse Steuerung des Strömungswiderstandes der Luftwege eine bedeutende Rolle bei der Einstellung eines Minimums an Atemarbeit für jede geforderte Ventilationsgröße spielt (vgl. auch HILDEBRANDT u. CUNTZE 1965).

4. Zur Prüfung der bronchomotorischen Arbeitsreaktion

Da nach den bisherigen Befunden angenommen werden darf, daß die Steuerung der Bronchialweite einen integrierenden Bestandteil der Atmungsregulation bei Arbeit darstellt (vgl. HILDEBRANDT u. CUNTZE 1965), ist damit zu rechnen, daß die einfach zu handhabende pneumometrische Untersuchung der bronchomotorischen Arbeitsreaktion zunehmend praktische Bedeutung gewinnen wird. Das gilt insbesondere auch für die Beurteilung obstruktiver Ventilationsstörungen, deren Häufigkeit in schnellem Zunehmen begriffen ist (SCHMIDT u. Mitarb. 1965; SCHMIDT 1967).

Zur Frage, mit welcher Untersuchungsanordnung die individuelle bronchomotorische Reaktion bei Arbeit quantitativ am besten erfaßt werden kann, läßt sich aufgrund unserer Erfahrungen folgendermaßen Stellung nehmen: Bei kontinuierlich ansteigender Belastung (10 Watt/min) ist ein linearer Anstieg der Pneumometerwerte nur im Bereich bis zu 100 Watt nachweisbar, so daß die Bestimmung eines Leistungsindex der bronchomotorischen Arbeitsreaktion wie beim Leistungspulsindex n. MÜLLER (1962) auf diesen Leistungsbereich beschränkt werden kann. Diese Beschränkung auf submaximale Belastungen dürfte auch für klinische Zwecke von Vorteil sein. Die mangelhafte Reproduzierbarkeit der LASI-Werte

weist aber darauf hin, daß eine einmalige Kontrolle des Pneumometerwertes pro 10 Watt Belastungssteigerung nicht ausreicht, um bei der naturgemäß großen Streuung der Meßwerte die Steilheit der Pneumometerwertsteigerung hinreichend sicher zu erfassen. Die Zahl der Meßtermine läßt sich allerdings nicht beliebig erhöhen, da die Ausführung des Atemstoßes eine zusätzliche Belastung des Probanden darstellt. Es muß einer besonderen Prüfung vorbehalten bleiben, ob die Erhöhung der Meßhäufigkeit auf 2 bis 3 Messungen pro 10 Watt bereits eine hinreichende Urteilssicherheit ergibt. Die wesentlich bessere Reproduzierbarkeit bei unseren Längsschnittuntersuchungen an geübten Versuchspersonen läßt dies möglich erscheinen, zumal hierbei auch die von HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) gefundene positive Korrelation zwischen Pulsanstieg und Pneumometerwertsteigerung zur Darstellung kam (vgl. Tabelle 7 und 8).

Ob die Untersuchung im steady state auf wenigen Belastungsstufen eine erheblich bessere Möglichkeit zur quantitativen Beurteilung der bronchomotorischen Arbeitsreaktion bietet, läßt sich noch nicht sicher entscheiden. Zwar kann hierbei die Häufigkeit der Meßtermine auch bei 1-minütlichen Meßabständen leichter gesteigert werden, da es sicher ist, daß der Pneumometerwert im steady state über lange Zeit auf einem konstanten Niveau bleibt (STEIGER u. HADORN 1946; HILDEBRANDT u. CUNTZE 1965), doch besteht der Nachteil einer längeren Untersuchungsdauer mit der Gefahr von zusätzlichen Ermüdungseinflüssen. HILDEBRANDT u. CUNTZE (1965) haben die Reproduzierbarkeit ihrer Befunde nicht im Einzelfall überprüft, und die Ergebnisse für die einzelnen Belastungsstufen an verschiedenen Untersuchungstagen gewonnen. Da aber die Pneumometerwertzunahme auch unter diesen Bedingungen gut linear zur Leistung erfolgte und außerdem eine ziemlich strenge Korrelation zur Pulssteigerung bestand, scheint es nicht ausgeschlossen, daß die Bestimmung eines Leistungsindex der bronchomotorischen Arbeitsreaktion aufgrund von steady state-Untersuchungen zu einer größeren Sicherheit in der individuellen Beurteilung führt.

V. Zusammenfassung

Bei 52 gesunden Versuchspersonen wurde der Verlauf von Pneumometerwert, Puls- und Atemfrequenz durch 1-minütliche Messungen während kontinuierlich ansteigender Arbeitsbelastung auf dem Fahrradergometer (10 Watt/min) bis zu 200 Watt, sowie während der nachfolgenden Erholung verfolgt. Im gleichen Untersuchungsgang wurde die Wirkung einer Aludrin(R)-Inhalation pneumometrisch kontrolliert. 34 der Probanden wurden unter Ausschluß von Trainingseffekten zweimal untersucht. Außerdem wurden bei 3 der Versuchspersonen die Belastungsversuche täglich über einen Zeitraum von 32 Tagen wiederholt. Für je 100 Watt Belastungszunahme wurden Leistungsindizes in drei verschiedenen Belastungsbereichen (0 - 100, 50 - 150 und 100 - 200 Watt) berechnet.

Der Pneumometerwert nimmt im Bereich von 0 - 100 Watt nahezu linear um durchschnittlich 0,93% d.Sollw./10 Watt zu. Bei weiterer Belastungssteigerung bleibt er bis ca.150 Watt auf dem gleichen Niveau, um dann, in signifikantem zeitlichen Zusammenhang mit dem Auftreten sichtbaren Schweißes an der Stirnhaut, erneut anzusteigen.

Die durch Aludrin-Inhalation ausgelöste Zunahme des Pneumometerwertes wird im Belastungsversuch im Mittel bereits bei etwa 50 Watt überschritten.

Während bei 86 Einzeluntersuchungen in keinem Belastungsbereich sichere Beziehungen zwischen den Leistungsindizes des Pneumometerwertes und der Pulsfrequenz nachweisbar waren, bestanden bei den 3 Längsschnittuntersuchungen im unteren bzw. mittleren Belastungsbereich signifikante positive Korrelationen. Dementsprechend ging hier auch mit dem trainingsbedingten Rückgang des Leistungspulsindex eine Abnahme des pneumometrischen Leistungsindex einher.

Die Steilheit der Pneumometerwertzunahme bei Arbeit ist in verschiedenen Belastungsbereichen signifikant von der Ausgangslage abhängig. Zur individuellen Aludrin-Wirkung wurde

keine Beziehung gefunden.

Unter Berücksichtigung der Literatur wird aus den Ergebnissen geschlossen, daß der Mechanismus der bronchomotorischen Reaktion bei Arbeit in den verschiedenen Belastungsbereichen unterschiedlich ist. Während bis zu etwa 100 Watt eine nervale Steuerung in engerem Zusammenhang mit der zentralen Atmungs- und Kreislaufregulation angenommen werden kann, wird für das erneute Einsetzen der Pneumometerwertsteigerung im Zusammenhang mit dem Schweißausbruch ein zusätzlicher Steuerungsmechanismus vermutet, bei welchem möglicherweise eine Adrenalinausschüttung beteiligt ist.

Die unter 1-minütlicher Kontrolle ermittelten Leistungsindizes der pneumometrischen Reaktion bei kontinuierlich ansteigender Arbeitsbelastung in den 34 Wiederholungsuntersuchungen waren ungenügend reproduzierbar. Daher wird zur individuellen Beurteilung der bronchomotorischen Arbeitsreaktion eine Erhöhung der Meßhäufigkeit für notwendig gehalten. Da diese leichter unter steady-state-Bedingungen durchgeführt werden kann, wird die Anwendung einer stufenweisen Belastungssteigerung empfohlen.

VI. Literaturverzeichnis

AEPLI, R.: Die symptomatische Behandlung des Asthma bronchiale. Schweizer Med.Wschr. 29, 951-957 (1966)

ANTHONY, A.J., u. H. VENRATH: Funktionsprüfung der Atmung. Leipzig: Barth-Verlag 1962

ARTNER, J.: Die vegetative Steuerung des Zyklus. Arch.Gynäk. 185, 85-110 (1954)

ARTNER, J.: Die Bedeutung der vegetativen Untersuchung in der gynäkologischen Endokrinologie. Fortschr.d.Gebh.u.Gynäk. 10, 1-16 (1960)

BALDWIN, E., A. COURNAND, a. D.W. RICHARDS: Pulmonary insufficiency: I. Methods of analysis physiologic classification, standard values in normal subjects. Medicine (Baltimore) 27, 243-278 (1948)

BARTELS, H., E. BÜCHERL, C.W. HERTZ, A. RODEWALD u. W. SCHWAB: Lungenfunktionsprüfungen. Berlin - Göttingen - Heidelberg: Springer 1959

BLOHMKE, M., H. STUMPF, O. STELZER u. W.D. ARIES: Bestimmung der Zuverlässigkeit von zwei submaximalen Belastungsverfahren und ihre Beziehung zueinander. Z.angew.Physiol. 23, 1-11 (1966)

BOEHRINGER-Druckschrift: Aludrin. Wissenschaftl.Abteilung, C.H. Boehringer Sohn, Ingelheim/Rhein 1952

BÖRNGEN, U.: Praktische Lungenfunktionsdiagnostik. Über das Ausmaß Restriktivität - Obstruktivität und vergleichende Atemstoßmessungen. Med.Klinik 62, 1773-1781 (1967)

BRISCOE, W.A. a. A.B. DUBOIS: The relationship between airway resistance airway conductance and lung volume in subjects of different age and body size. J.Clin.Invest. 37, 1279-1285 (1958)

BUHR, G. U. H. OSTEN: Eine neue Apparatur zur funktionellen Diagnostik des cardiopulmonalen Systems auf der Grundlage der Integration des Pneumotachographen mit synchroner Registrierung von 11 Meßgrößen. Z.f.Kreislaufforschg. 52, 64-76 (1963)

CANNON, J.R.: Erg.Physiol. 27, 380 (1927)
zit.n. STEIGER u. HADORN.

CHIANG, S.T., N. H. STEIGBIGEL u. H.A. LYONS: Pulmonary compliance and nonelastic resistance during treadmill exercise.
J.appl.Physiol 20, 1194-1198 (1965)

CUNTZE, H.: Über die Veränderungen des Pneumometerwertes bei dosierter Arbeitsbelastung.
Med.Diss. Marburg/Lahn 1965

DOCUMENTA GEIGY: Wissenschaftliche Tabellen, 6. Aufl.,1960

FABEL, H., u. J. HAMM: Vergleichende spirographische und pneumometrische Messungen des exspiratorischen Atemstoßes.
Dtsch.Med.Wschr. 87, 2361-2367 (1962)

FIEDLER, H.P.: Der Schweiß (Entstehung, Zusammensetzung und Bekämpfung) mit einem Beitrag über die Desodorierung.
Aulendorf/Württ.: Editio Cantor 1955

FRITZ, U.: Vergleichsuntersuchungen über Vitalkapazität, Pneumometer- und Tiffeneau-Wert. Zur Messung des Atemstoßes mittels Spirographie und Pneumometrie.
Med.Welt 19, 1049-1056 (1965)

HADORN, W.: Über die Bestimmung des Exspirationsstoßes (maximale Ausatmungsstromstärke).
Z.klin.Med. 140, 266-290 (1942)

HALLET, W.Y., a. C.J. MARTIN: Obstructive Pulmonary Disease Testing in Hospital Patients.
Amer.Rev.respir.Dis. 86, 686-696 (1962)

HANKE, O., u. G. HILDEBRANDT: Zur Atemfunktionsdiagnostik in der Praxis.
Arch.phys.Ther. 8, 277-280 (1956)

HÄUSLER, H., u. H. JULICH: Untersuchungen über die Wirkung von Aludrinaerosolinhalation und körperlicher Arbeit auf die Pneumotachogrammform bei Gesunden und Kranken.
Z.klin.Med. 156, 236-251 (1960).

HILDEBRANDT, G.: Hat die Atemstoßmessung (Pneumometrie) praktische Bedeutung?
Berl.Med. 11, 108-110 (1960 a)

HILDEBRANDT, G.: Die rhythmische Funktionsordnung von Puls und Atmung.
Z.angew.Bäder- u. Klimaheilk. 7, 533-615 (1960 b)

HILDEBRANDT, G.: Biologische Rhythmen und ihre Bedeutung für die Bäder- und Klimaheilkunde.
In: W. AMELUNG u. A. EVERS: Handbuch der Bäder- und Klimaheilkunde, S. 730 - 757. Stuttgart: Schattauer 1962 a

HILDEBRANDT, G.: Reaktionsprognostik in der Balneotherapie.
Arch.phys.Ther. 14, 39-52 (1962 b)

HILDEBRANDT, G.: Die Bedeutung der Atemstoßmessung (Pneumometrie) für die Atemfunktionsdiagnostik.
Ärztl.Forsch. 17, 571-578 (1963)

HILDEBRANDT, G.: Leistung und Ordnung. Physiologische Gesichtspunkte zur Rehabilitationsforschung.
Med.Welt 17 (N.F.), 2732-2740 (1966)

HILDEBRANDT, G., u. H. CUNTZE: Pneumometrische Untersuchungen über die bronchomotorische Reaktion bei Arbeit.
Int.Z.angew.Physiol.einschl.Arbeitsphysiol. 21, 247-268 (1965)

HILDEBRANDT, G., u. F.-J. DAUMANN: Die Koordination von Puls- und Atemrhythmus bei Arbeit.
Int.Z.angew.Physiol.einschl.Arbeitsphysiol. 21, 27-48 (1965)

HILDEBRANDT, G., u. O. HANKE: Über die Norm des Atemstoßes in bezug auf die Vitalkapazität.
Ärztl.Wschr. 11, 439-445 (1956)

HILDEBRANDT, G., u. A. HILDEBRANDT: Oszillographische Praxis, mit dem Oszillographen zur doppelseitigen Pulsschreibung nach GESENIUS u. KELLER.
Bosch & Speidel, Jungingen/Hohenz. 1958

HILDEBRANDT, G., u. G. HILDEBRANDT-EVERS: Thorakographische Studien mit dem Oszillographen nach GESENIUS u. KELLER.
Z.exper.Med. 120, 244-270 (1953)

HILDEBRANDT, G., u. L. PÖLLMANN: Untersuchungen über die bronchomotorische Reaktion bei Arbeit
Pflügers Arch.ges.Physiol. 291, 67 (R) (1966)

HILDEBRANDT, G., u. H. ROHE: Physiologische Grundlagen für die Atemstoßmessung bei Aludrininhalationstest.
Med.Welt 1964, 325-332

HOFF, F.: Klinische Physiologie und Pathologie. Stuttgart: Georg Thieme, 1962

HOLLMANN, W.: Der Arbeits- und Trainingseinfluß auf Kreislauf und Atmung. Darmstadt: Dietrich Steinkopff 1959

HOLLMANN, W.: Die Beeinflussung der körperlichen Leistungsfähigkeit von Rekruten durch Training. Wehrmed. Monatsschrift 5, 128-131 (1967)

KAPFERER, J.M.: Der nutzbare Anteil der Vitalkapazität (TIFFENEAU-Test). Thoraxchirurgie 1, 547-557 (1954)

KIRCHHOFF, H.W.: Untersuchungen über das Verhalten von Pulsfrequenz und Blutdruck im Belastungsversuch. Wehrmedizin 1, 11-26 (1963)

KONZETT, H., u. R. RÖSSLER: Versuchsanordnung zur Untersuchung an der Bronchialmuskulatur. Arch.exp.Path.u.Pharm. 195, 71-74 (1940)

LEONARDS, A.K.: Der maximale Exspirationsstrom. Untersuchung der Lungenfunktion bei Gesunden. Acta allerg. (Kbh.) 21, 99-138 (1966)

MELLEROWICZ, H.: Ergometrie. München u. Berlin: Urban & Schwarzenberg, 1962

MELLEROWICZ, H.: Bericht über die Sitzung der internationalen Ergometrie-Standardisierungskommission. Sportarzt und Sportmedizin, Heft 8, 405 - 408 (1966)

MENZEL, W.: Menschliche Tag-Nacht-Rhythmik und Schichtarbeit. Basel - Stuttgart: Benno Schwabe & Co. 1962

MÜLLER, E.A.: Der Leistungspulsindex als Maß der Leistungsfähigkeit. Arbeitsphysiol. 14, 271-284 (1950)

MÜLLER, E.A.: Die physische Ermüdung. In: E.W. BAADER: Handbuch der gesamten Arbeitsmedizin, S. 405-441, Berlin - München - Wien: Urban & Schwarzenberg 1961

MÜLLER, E.A.: Der Leistungspulsindex als Maß der körperlichen Leistungsfähigkeit im Beruf.
Methoden des Max-Planck-Instituts für Arbeitsphysiologie, Dortmund 1962

MÜLLER, E.A.: Methoden zur Diagnose der physischen Leistungsfähigkeit.
Arbeitsmedizin 4, 79-83 (1964)

MÜLLER, E.A. u. Th. HETTINGER: Der Verlauf der Zunahme der Muskelkraft nach einem einmaligen maximalen Trainingsreiz.
Int.Z.angew.Physiol.einschl.Arbeitsphysiol. 16, 184-191 (1956)

OTTO, E.: Die Bedeutung des Atemstoßes in der Klinik, besonders bei Asthmakranken. Eine Messungsmethode.
Münch.Med.Wschr. 1937, 738-740

ROHE, H.: Grundlagen für die pneumometrische Diagnostik mit dem Aludrininhalationstest.
Med.Diss.Marburg/Lahn 1965

SALINGER, H.: Die rechnerische Auswertung statistischer Beobachtungsergebnisse (Einführung in die Kollektivmaßlehre).
In: Th. BRUGSCH u. F.H. LEWY: Die Biologie der Person Bd. I, S. 135-190.
Berlin u. Wien: Urban & Schwarzenberg 1926

SCHMIDT, O.P.: Das bronchitische Syndrom.
Medizin heute 16, 141-144 (1967)

SCHMIDT, O.P., W. GÜNTHER u. H. BOTTKE: Das bronchitische Syndrom.
München: J.F. Lehmann-Verlag 1965

STEIGER, P., u. W. HADORN: Zur Physiologie der Bronchialmuskulatur.
Helv.Med.Acta - Series A, 13, 543-558 (1946)

STOBOY, H., u. G. FRIEDEBOLD: Das Verhalten des Skeletmuskels nach Abbruch eines isometrischen Trainings.
Pflügers Arch.ges.Physiol. 278, 95 (R) (1963)

STORCH, J.: Methodische Grundlagen zur Bestimmung der Puls-Atem-Koppelung beim Menschen und ihr Verhalten im Nachtschlaf. Med.Diss.Marburg/Lahn 1967

TIFFENEAU, R., u. A. PINELLI: Régulation bronchique de la ventilation pulmonaire. J.franç.Méd.Chir.thor. 3, 221-244 (1948)

VOIGT, E.D. u. Mitarb.: Unveröffentl. Untersuchungen.

WIDDICOMBE, J.G., a. J.A. NADEL: Airway volume, airway resistance, and work and force of breathing theory. J.appl.Physiol. 18,863-868 (1963)

WILBRANDT, R.: zit.n. STEIGER u. HADORN 1946.

WRIGHT, B.M., a. C.B. McKERROW: Maximum Forced Expiratory Flow Rate as a Measure of Ventilatory Capacity. Brit.med.J. 21, 1041-1047 (1959)

WYSS, F.: Tagesperiodische Schwankungen der Pneumometerwerte und ihre praktische Bedeutung. Verh.Dtsch.Ges.Inn.Med. (im Druck)

ZEHNDER, H.: Untersuchungen der Lungenfunktion bei Gesunden. Helv.Med.Acta 3, 245-263 (1960)

ZUIDEMA, P.,u. A.D. van ESSEL: Messung der Tagesschwankungen des bronchialen Strömungswiderstandes bei Asthmatikern. Schweiz.med.Wschr. 95, 805-808 (1965)

Am Ende meiner Arbeit danke ich Herrn Professor Dr. med. G. Hildebrandt für die Überlassung des Themas, das ständige Interesse und seine unermüdliche Förderung sowie für die Möglichkeit, in der Außenstelle Lichtenau seines Institutes die Untersuchungen durchführen zu können.

Mein Dank gilt auch der Deutschen Bundeswehr, insbesondere den Herren Oberfeldarzt Dr. Rüdt und Oberstleutnant von Gram, für das Einverständnis, daß sich Soldaten als Versuchspersonen zur Verfügung stellen durften.

Herzlich danke ich Frau Behrens, Frau Hartmann, Fräulein Schöppke und Frau Umbeer, die mir bei der äußeren Gestaltung der Arbeit behilflich waren.

L e b e n s l a u f

Am 22. November 1941 wurde ich, erster von zwei Söhnen des HNO-Facharztes Dr. Ludwig Pöllmann und seiner Ehefrau Dr.med. Katharina, geb. Braun, in Znaim (Niederdonau) geboren. Nach der Vertreibung aus der Heimat und längerem Aufenthalt in Niederösterreich kamen wir nach Hessen.

Im Herbst 1948 trat ich in die Volksschule in Wabern (Bez. Kassel) ein. Ab Ostern 1952 besuchte ich die König-Heinrich-Schule, Gymnasium, in Fritzlar (Bez.Kassel) und erhielt dort am 16. Februar 1961 das Zeugnis der Reife.

Am 8. Dezember 1958 verstarb meine liebe Mutter plötzlich.

Für die Zeit vom 1. April 1961 bis 30. September 1962 diente ich als Wehrpflichtiger bei der Deutschen Bundeswehr.

Am 20. Februar 1962 starb mein Vater nach längerer Krankheit.

Ab Wintersemester 1962/63 studierte ich Medizin an der Philipps-Universität in Marburg(Lahn). Am 31. Juli 1963 bestand ich die naturwissenschaftliche Vorprüfung und nach dem 5. Studiensemester am 20. April 1965 die ärztliche Vorprüfung. Um meine Kenntnisse auf dem Gebiet der Zahnkrankheiten zu vertiefen, nahm ich an einigen Kursen und Vorlesungen für Zahnmediziner teil. Ich habe das medizinische Staatsexamen am 25. Juli 1968 bestanden.

Meine akademischen Lehrer waren in Marburg die Damen und Herren Professoren und Dozenten:

Aust, Beckmann, Behrend, Berendes, Blum, Bommer, Braun-Falco, Brück, Bücher, Buchholz, Cleve, Deicher, Delbrück, Dimroth, Dittrich, Dölle, Drawert, Du Mesnil, Exner, Friederich, Ganz, Gedigk, Golenhofen, Gosmann, Hamm, Hardewig, Hartmann, Havemann, Hensel, Hermann, Herfarth, Hettler, Heuser, Hildebrandt, Hohorst, Hupe, Jacob, Karlson, Klingenberg, Knauff, Krönke, Lang, Lehmann-Grube, Linneweh, Löhr, Lübbers, Mahr, Mann, Martini, Nocke, Oehmig, Petry, Pfütz, Poetschke, Rodeck, Rohen, Salfeld, Sauer, Schiff, Schimassek, Schleyer, Schlosser, Schmid, Schmidt, Schmitz-Moormann, Schrappe, Schwaiger, Seidel, Siegert, Siess, Spiegelberg, Staib, Straub, Streicher, Strohmeyer, Teller, Vogt, Voss, Walcher, Wendt, Willenbockel, Witzel, Würtele.